

Research Paper

Morphophysiological Evaluation of Flooding Stress Tolerance in Brassica (*Brassica* spp.) Genotypes

Faezeh Noori¹, Hemmatollah Pirdashti² , Yasser Yaghoobian³, and Mehraoosh Emamian Tabarestani⁴

- 1- Ph.D. Student in Agrotechnology-Crop Ecology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2- Professor, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (Corresponding author: h.pirdashti@sanru.ac.ir)
3- Assistant Professor, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
4- Ph.D. in Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 02 June, 2025

Revised: 18 October, 2025

Accepted: 22 November, 2025

Extended Abstract

Background: Flooding is one of the most significant abiotic stresses and a major limiting factor for agricultural production worldwide, adversely affecting the growth, development, and final yield of crop plants. Since the *Brassica* genus, including rapeseed (*Brassica napus* L.), is one of the most important sources of vegetable oil globally, it is essential to identify tolerant genotypes to flooding stress. The development and enhancement of flooding-tolerant and stress-adapted rapeseed cultivars are important for a sustainable increase in oil production. Accordingly, the present study was conducted to evaluate the response of *Brassica* genotypes under flooding stress by examining morphophysiological traits.

Methods: This study was conducted as a factorial experiment based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications under greenhouse conditions during the 2022–2023 growing season. The experiment examined three durations of flooding stress (0, 8, and 16 days) across 20 genotypes of *Brassica* spp. Flooding stress was applied at the four-leaf stage (BBCH = 14). The measured various morphological and physiological traits were stem and root lengths, stem diameter (SD), the number of green and yellow leaves (NGL and NYL), leaves, stem and root fresh and dry weights (LFW, SFW, RFW, LDW, SDW, and RDW), leaf area (LA), chlorophyll content (Chl), relative water content (RWC), and electrolyte leakage (EL). Additionally, analysis of variance (ANOVA), cluster analysis, and biplot (GGE) analysis were performed to evaluate the relationships among the morphological and physiological traits and to determine the relative importance of these traits in contributing to the performance of the studied genotypes.

Results: Varying levels of flooding stress negatively affected the examined traits. Furthermore, different genotypes markedly varied under different flooding conditions. Cluster analysis categorized the genotypes into two clusters under control (non-flooded) and severe flooding conditions, and into three clusters under moderate flooding. Under non-flooded conditions, Group II, which included the genotypes Liberdonga, Burgundy, and Barossa, demonstrated significantly better performance than Group I. Under moderate flooding, Group III, including Liberdonga and Burgundy, exhibited the best performance. Under severe flooding, Group I, which comprised Burgundy and Liberdonga, was identified as the superior group. Discriminant function analysis confirmed the accuracy of genotype grouping at all stress levels, achieving a 100% correct classification rate across all three levels. The Wilks' Lambda values were statistically significant for the first functions. Biplot analysis corroborated these findings, indicating that the Burgundy and Liberdonga genotypes performed best across all three flooding levels and were closest to the ideal genotype. In contrast, the Topas and PGR genotypes consistently exhibited the weakest performance under all conditions. Mean comparisons of traits among groups in the control condition revealed significant differences in SD, LA, and DW. Under moderate flooding, the groups exhibited significant differences in LA, DW, and plant height (PH). In severe flooding conditions, SD, LA, and DW also contributed to significant differences among the groups. Correlation analysis revealed a significant positive correlation between LDW and SD, LA, and RDW. GGE biplot analysis under control conditions indicated that the first and second principal components explained 35.49% and 21.11% of the total variance, respectively, accounting for a cumulative total of 56.60% of the variation. Under moderate flooding, the two components explained 35.99% and 15.31% of the total variance, respectively, resulting in a cumulative total



of 51.30%. Under severe flooding conditions, the first and second components accounted for 29.57% and 20.03% of the total variance, respectively, cumulatively explaining 49.78% of the total variation.

Conclusion: Based on the graphical GGE biplot analysis, LDW, RDW, and LA were identified as key morphophysiological indicators for selecting flooding-tolerant genotypes. Since both yield and stability traits are essential for identifying superior genotypes across various environments, Burgundy and Liberdonna were classified as tolerant genotypes, while Topas and PGR were identified as sensitive genotypes. In general, the mentioned genotypes are recommended for further studies.

Keywords: *Brassica*, Cluster analysis, Flooding Stress, GGE biplot, Morphological and physiological traits

How to Cite This Article: Noori, F., Pirdashti, H., Yaghoubian, Y., & Emamian Tabarestani, M. (2026). Morphophysiological Evaluation of Flooding Stress Tolerance in Brassica (*Brassica* spp.) Genotypes. *J Crop Breed*, 18(1), 132-148. DOI: 10.61882/jcb.2026.1617



مقاله پژوهشی

ارزیابی مورفوفیزیولوژیکی تحمل ژنوتیپ‌های جنس *Brassica* spp.) به تنش غرقابیفایزه نوری^۱، همت‌اله پیردشتی^۲، یاسر یعقوبیان^۳ و مهرانوش امامیان طبرستانی^۴

۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی - آکولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۲- استاد، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسوول: h.pirdashti@sanru.ac.ir)
 ۳- استادیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۴- دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶
صفحه: ۱۳۲ تا ۱۴۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: تنش غرقاب یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی و عامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان است که رشد، نمو و عملکرد نهایی گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به این‌که جنس *Brassica* spp.) از جمله کلزا، یکی از مهم‌ترین منابع روغن گیاهی در جهان به‌شمار می‌رود، شناخت ژنوتیپ‌های متحمل به تنش غرقاب یک ضرورت است. به‌همین دلیل، با توسعه و پیشرفت ارقام کلزای متحمل و سازگار به تنش می‌توان زمینه افزایش تولید پایدار این محصول را فراهم نمود. بنابر این، پژوهش حاضر با هدف بررسی واکنش ژنوتیپ‌های جنس *Brassica* spp.) به تنش غرقاب با استفاده از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک انجام شد.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ با سه سطح تنش غرقاب (۸، ۱۶ و ۲۰ روز) و ۲۰ ژنوتیپ جنس *Brassica* spp.) اجرا شد. تنش غرقاب در مرحله چهار برگ (BBCH = 14) اعمال شد. در ادامه، ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک شامل صفات طول ساقه و ریشه، قطر ساقه، تعداد برگ سبز و زرد، وزن تر و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه، سطح برگ، میزان کلروفیل، محتوای آب نسبی (RWC) و نشت الکترولیت اندازه‌گیری شدند. سپس، برای ارزیابی روابط موجود بین صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک و بررسی اهمیت نسبی صفات مؤثر بر عملکرد ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، تجزیه واریانس، تجزیه خوشه‌ای و بای‌پلات انجام شد.

یافته‌ها: سطوح مختلف تنش غرقاب آثار منفی بر صفات مورد مطالعه داشتند. همچنین، میزان تغییرات ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط متفاوت غرقابی برای بیشتر صفات یکسان نبود و ژنوتیپ‌ها واکنش‌های متفاوتی در سه سطح تنش نشان دادند. تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌ها را در شرایط شاهد بدون غرقاب و غرقاب شدید به دو گروه و در شرایط غرقاب متوسط به سه گروه تفکیک کرد. در سطح بدون غرقاب، گروه دوم شامل ژنوتیپ‌های لیبرادونا، بورگوندی و باروسا برتری قابل توجهی نسبت به گروه اول داشت. در غرقاب متوسط، گروه سوم شامل ژنوتیپ‌های لیبرادونا و بورگوندی بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. در غرقاب شدید نیز گروه اول شامل ژنوتیپ‌های بورگوندی و لیبرادونا به‌عنوان بهترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. تحلیل تابع تشخیص در تمامی سطوح تنش نیز صحت گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها را تأیید کرد، به‌طوری‌که صحت دسته‌بندی در هر سه سطح تنش ۱۰۰ درصد بود و لامبدای ویلکس برای توابع اول در سطح معنی‌دار قابل توجهی قرار داشت. نتایج بای‌پلات نیز ضمن تأیید این داده‌ها، نشان داد که ژنوتیپ‌های بورگوندی و لیبرادونا در هر سه سطح تنش بهترین عملکرد را داشتند و در نزدیکی ژنوتیپ‌های ایده‌آل قرار گرفتند. در مقابل، ژنوتیپ‌های توپاس و پی‌جی‌ار در تمامی شرایط ضعیف‌ترین نتایج را نشان دادند. مقایسه میانگین صفات بین گروه‌های ایجادشده در سطح شاهد بدون غرقاب نشان داد که دو گروه از نظر صفات قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک اندام‌ها و در شرایط غرقاب متوسط، از نظر صفات سطح برگ، وزن خشک اندام‌ها و ارتفاع بوته با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند. در سطح تنش غرقاب شدید، صفات قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک اندام‌ها باعث تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها شدند. همچنین، وزن خشک برگ با صفات قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک ریشه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. نتایج تجزیه GGE بای‌پلات در شرایط شاهد (بدون غرقاب) نشان داد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۳۵/۴۹ درصد و ۲۱/۱۱ درصد از کل واریانس موجود را تبیین کردند و مجموعاً ۵۶/۶ درصد از کل تغییرات را توضیح دادند. در شرایط تنش غرقاب، متوسط دو مؤلفه اصلی به ترتیب ۳۵/۹۹ درصد و ۱۵/۳۱ درصد از کل واریانس داده‌ها را توضیح دادند و در مجموع ۵۱/۳ درصد از تغییرات کل را پوشش می‌دهند. در شرایط غرقاب شدید نیز مؤلفه‌های اصلی به‌ترتیب ۲۹/۵۷ و ۲۰/۰۳ درصد از کل واریانس موجود را تبیین کردند و مجموعاً ۴۹/۷۸ درصد از کل تغییرات را توضیح می‌دهند.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج تجزیه گرافیکی بای‌پلات، صفات وزن خشک برگ و ریشه و سطح برگ به‌عنوان نشانگرهای مورفوفیزیولوژیکی برای شناسایی لاین‌های متحمل به تنش غرقاب شناسایی شدند. با توجه به این‌که در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر برای محیط‌های مختلف علاوه بر عملکرد صفات، پایداری نیز حائز اهمیت است، ژنوتیپ‌های بورگوندی و لیبرادونا به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل و ژنوتیپ‌های توپاس و پی‌جی‌ار به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس برای پژوهش‌های تکمیلی معرفی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک، *Brassica* spp.)، تنش غرقابی، تجزیه خوشه‌ای، GGE بای‌پلات

مقدمه

شب‌بویان (*Brassicaceae*) است که شامل گونه‌های متعددی مانند کلزا (*Brassica napus* L.)، کلم (*B. oleracea*)، خردل (*B. juncea*) و شلغم (*B. rapa*) می‌باشد. این گونه‌ها از منابع اصلی تأمین روغن خوراکی، پروتئین گیاهی و علوفه دام هستند (Zhang et al., 2025). در این میان، کلزا به‌عنوان سومین منبع بزرگ تولید روغن خوراکی در جهان شناخته می‌شود (FAO., 2025; Nath et al., 2016). کشت این محصول به‌دلیل مزایای تغذیه‌ای و اقتصادی فراوان، در حال گسترش

افزایش جمعیت جهانی و رشد تقاضا برای منابع غذایی، اهمیت تولید محصولات زراعی با بهره‌وری بالا و تأمین امنیت غذایی را دوچندان کرده است. امنیت غذایی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در توسعه پایدار مطرح است و کشت گیاهان زراعی با ارزش تغذیه‌ای و اقتصادی بالا، می‌تواند نقش مهمی در تحقق این هدف ایفا کند (Babaeian et al., 2021). جنس *Brassica* یکی از مهم‌ترین جنس‌های گیاهی در خانواده

Mo'tamedi & Bani Saeedi, 2022; Nooryazdan,)
(2024).

باتوجه به اهمیت کلزا در تأمین روغن خوراکی و نقش غرقاب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موانع کشت کلزا در استان‌های شمالی کشور، به‌ویژه مازندران (SadrAbadi Haghghi, 2023)، بررسی اثرات تنش غرقاب بر عملکرد این گیاه ضروری است و شناسایی ارقام و ژنوتیپ‌های مقاوم به این تنش می‌تواند راه‌کاری عملی برای افزایش تولید و بهبود پایداری عملکرد باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات تنش غرقاب بر سازوکارهای فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی ژنوتیپ‌های مختلف جنس براسیکا جهت شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به این شرایط انجام شد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای اصلاح برنامه‌های کشت و معرفی ارقام مقاوم‌تر به غرقاب، به‌ویژه در مناطق شمالی کشور، قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و به‌صورت گلخانه‌ای با هدف ارزیابی تحمل ۲۰ ژنوتیپ مختلف جنس براسیکا (جدول ۱) نسبت به شرایط غرقابی در سه زمان صفر (بدون تنش)، ۸ و ۱۶ روز تنش (Kuai *et al.*, 2020) به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار به‌اجرا درآمد. بذر این ژنوتیپ‌ها از شرکت توسعه کشت دانه‌های روغنی مازندران تهیه شد. ابتدا، خاک مورد استفاده در آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک زراعی برداشت و بعد از انجام آزمون خاک (جدول ۲) و عبور از الک ۲ میلی‌متری، به نسبت دو به یک با ماسه مخلوط شد (Emamian Tabarestani *et al.*, 2020). خاک مخلوط‌شده به میزان دو کیلوگرم در گلدان‌های پلاستیکی توزین شد و سپس ده عدد بذر کلزا در هر گلدان کشت گردید. گلدان‌ها در محیط سرپوشیده و دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و آبیاری آن‌ها به‌صورت روزانه و متناسب با شرایط رطوبتی خاک تا سطح ظرفیت زراعی انجام شد. در مرحله چهارم برگری (BBCH = 14)، گیاهچه‌ها تنک شدند و تعداد آن‌ها در هر گلدان به پنج بوته کاهش یافت. پس از آن، تیمار تنش غرقابی در سه سطح شاهد (بدون تنش)، ۸ (غرقاب متوسط) و ۱۶ روز (غرقاب شدید) اعمال شد. در تنش غرقاب، گلدان‌ها در سطوح بزرگ‌تر حاوی آب قرار داده شدند تا شرایط غرقابی شبیه‌سازی شود. در این شرایط، ساقه گیاه تا ارتفاع ۲ سانتی‌متر (Khadempir *et al.*, 2014) به زیر آب رفت. در نهایت، ۲۴ ساعت پس از اتمام تنش غرقابی صفات رویشی مانند تعداد برگ شمارش و ارتفاع بوته و طول ریشه با خط‌کش مدرج، قطر ساقه با کولیس دیجیتال، سطح برگ با استفاده از نرم افزار Digimizer، وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه با ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم گرم و حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری گردیدند. همچنین، صفات فیزیولوژیکی مانند محتوای نسبی آب برگ، نشت الکترولیت، غلظت کلروفیل a ، b ، $a+b$ و a/b ، کاروتنوئید و عدد اسپد (SPAD-502-minolta, Japan) اندازه‌گیری شدند.

است و سالانه بیش از ۶۰ میلیون تن دانه روغنی کلزا در سطح جهانی تولید می‌شود (FAO, 2025). در ایران، به‌ویژه در استان مازندران، کلزا به‌خاطر سازگاری بالا و امکان کشت دوم پس از برداشت برنج، نقش مهمی در افزایش درآمد شالی‌کاران و توسعه کشاورزی پایدار دارد (Ghasem Beigi *et al.*, 2020). کلزا به‌دلیل مصرف خوراکی روغن و استفاده از کنجاله آن در تغذیه دام و طیور در میان بارزش‌ترین محصولات زراعی و روغنی در جهان به‌ویژه در مناطق معتدل قرار می‌گیرد (Rabonatahiry *et al.*, 2021). امروزه، کاربرد رقم‌های جدید و اصلاح‌شده موجب شده است که کیفیت و کمیت روغن این گیاه برای مصرف خوراکی انسان افزایش قابل‌توجهی پیدا کند (Imantalab *et al.*, 2024).

در بین تنش‌های غیرزیستی، غرقاب یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی است، زیرا بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی تأثیر مستقیم دارند (Gomathi *et al.*, 2015). این تنش معمولاً ناشی از عوامل متعددی از جمله بارش‌های سنگین، زهکشی نامناسب، نفوذپذیری پایین خاک و وقوع سیلاب است که منجر به کاهش اکسیژن خاک، اختلال در تبادلات گازی و کاهش جذب مواد مغذی می‌شود (Harirforoush *et al.*, 2019; Rosouli *et al.*, 2011). مطالعات متعددی اثرات غرقاب بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که این تنش می‌تواند موجب کاهش عملکرد دانه، افت کیفیت روغن و اختلال در رشد مراحل اولیه گیاهچه‌ای کلزا گردد (Bange *et al.*, 2004). بررسی‌ها نشان داده‌اند که غرقاب از طریق تخریب اسیدهای چرب و اختلال در مسیرهای بیوسنتزی لیپیدها، کیفیت روغن کلزا را کاهش می‌دهد (Xu *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2023). همچنین، این تنش موجب زوال رنگدانه‌های فتوسنتزی، کاهش سطح کلروفیل و اختلال در متابولیسم نیتروژن شده، در نهایت منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Rosouli *et al.*, 2011; Ren *et al.*, 2014). علاوه بر این، اعمال تنش غرقاب در مرحله رشدی ۴ تا ۶ برگی سبب آسیب به ساختار میتوکندری و کلروپلاست برگ و کاهش ارتفاع گیاه و اجزای عملکرد شده است (Hong *et al.*, 2024). علاوه بر کلزا، پژوهش‌ها در سایر گیاهان زراعی نیز نشان داده‌اند که غرقاب با کاهش جذب مواد مغذی، سطح برگ و فرآیندهای فتوسنتزی، رشد و تولید گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ahmadi Malek & Kashani Farhangian, 2010).

انتخاب ارقام مقاوم یکی از راه‌کارهای مؤثر برای کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی و بهبود عملکرد گیاهان زراعی در شرایط نامساعد به‌شمار می‌رود (Foroughi & Galeshi, 2007). مطالعات انجام‌شده روی کلزا نشان داده‌اند که شناسایی و استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم به غرقاب می‌تواند اثرات نامطلوب این تنش را کاهش و پایداری تولید را افزایش دهد (Moradbeigi *et al.*, 2019). مطالعات مشابه در سایر گیاهان زراعی نیز نشان داده‌اند که انتخاب ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی و غرقاب، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش عملکرد و کاهش خسارت‌های ناشی از شرایط تنش دارد

جدول ۱- برخی ویژگی‌های ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در آزمایش

ردیف	نام انگلیسی	کد	نام علمی	کشور تولیدکننده	نام فارسی
Row	English name	Code	Scientific name	Origin	Persian name
1	Topas	ARCB185	<i>B. napus</i>	سوئد (Sweden)	توپاس
2	Libradonna	ARCB298	<i>B. napus</i>	آلمان (Germany)	لیبرادونا
3	Barossa	ARCB301	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	باروسا
4	Derby	ARCB302	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	دربی
5	Ag-comet	ARCB303	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	آگ-کومت
6	Borgonde	ARCB328	<i>B. juncea</i>	کانادا (Canada)	بورگوندی
7	Heading	ARCB336	<i>B. juncea</i>	تایوان (Taiwan)	هدینگ
8	Emerald	ARCB483	<i>B. napus</i>	هلند (Netherlands)	امerald
9	R-33	ARCB509	<i>B. napus</i>	اوکراین (Ukraine)	آر ۳۳
10	Okapi	ARCB758	<i>B. napus</i>	آلمان (Germany)	اکاپی
11	Pampa	ARCB831	<i>B. napus</i>	آرژانتین (Argentina)	پامپا
12	PGR17644	ARCB850	<i>B. rapa</i>	چین (China)	پی‌جی آر
13	Hyola50	ARCB874	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	هایولا ۵۰
14	Hyola401	ARCB875	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	هایولا ۴۰۱
15	Hyola420	ARCB876	<i>B. napus</i>	استرالیا (Australia)	هایولا ۴۲۰
16	Zafar	ARCB880	<i>B. napus</i>	ایران (Iran)	ظفر
17	Delgan	ARCB881	<i>B. napus</i>	ایران (Iran)	دلگان
18	Zaman	ARCB897	<i>B. napus</i>	ایران (Iran)	زمان
19	Mahtab	ARCB898	<i>B. napus</i>	ایران (Iran)	مهتاب
20	RGS003	ARCB759	<i>B. napus</i>	کانادا (Canada)	آر جی اس

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

عمق نمونه برداری (cm)	درصد اشباع (SP %)	هدایت الکتریکی (EC*10)	اسیدیته گل اشباع (Saturated paste pH)	درصد مواد خنثی شونده (CCE %)	درصد ماده آلی (OM %)	کربن آلی (OC %)	فسفر قابل جذب (PPM)	پتاسیم قابل جذب (PPM)	ماسه (%)	لای (%)	رس (%)	یافت (Texture)
Sampling depth (cm)	Saturation percentage	Electrical conductivity	Calcium carbonate equivalent	Organic matter	Organic carbon	Available phosphorus	Available potassium	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		
0-30	53	0.51	7.79	21	2.75	1.6	13.2	372	38	38	24	لومی Loam

محتوای نسبی آب برگ^۱ (RWC)

پس از سرد شدن آب، دوباره هدایت الکتریکی نمونه‌ها ثبت شد (EC₂). سپس، درصد نشست الکترولیت‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Lutts et al., 1995).

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{نسبت نشست الکترولیت (درصد)} = \text{EC}_1 / \text{EC}_2 \times 100$$

عدد کلروفیل متر (اسپد)

عدد کلروفیل متر، مقدار تقریبی محتوای کلروفیل برگ (Chlorophyll Content Index - CCI یا SPAD Value) یا همان سبزیگی برگ را نشان می‌دهد. این عدد پس از اتمام شرایط غرقاب (BBCH = 17) با اندازه‌گیری از چهار نقطه آخرین برگ توسعه‌یافته قرائت و میانگین آن‌ها به‌عنوان عدد کلروفیل متر در محاسبه استفاده شد.

اندازه‌گیری رنگی‌های فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل، پس از اتمام شرایط غرقاب (BBCH = 17)، شش عدد پانچ از آخرین برگ توسعه‌یافته گیاه برداشته، در ۸ میلی‌لیتر متانول غوطه‌ور شدند و به‌مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و در دمای اتاق قرار گرفتند. سپس، میزان نور جذبی محلول در طول موج‌های ۶۶۵/۲ و ۶۵۲/۴ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر (Analytic jena- SPEKOL 1300) قرائت و ثبت شد. در نهایت، مقادیر کلروفیل (Chl_a) a ، (Chl_b) b ، کلروفیل کل (Chl_{a+b}) ، نسبت کلروفیل a/b ($Chl_{a/b}$) و کاروتنوئید

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ، پس از اتمام شرایط غرقاب (BBCH = 17) از آخرین برگ توسعه‌یافته گیاه نمونه تهیه و بلافاصله وزن تر^۲ (fw) آن با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به لوله آزمایش حاوی آب مقطر منتقل و به‌مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند تا برگ‌ها آماس پیدا کنند. برای اندازه‌گیری وزن آماس^۳ (tw)، برگ‌ها از لوله آزمایش خارج شدند، رطوبت اضافی با دستمال کاغذی گرفته شد و نمونه‌ها وزن شدند. سپس، نمونه‌ها در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و سپس توزین نمونه‌های خشک^۴ (dw) انجام و محتوای رطوبت نسبی برگ‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Ritchie & Nguyen, 1990).

$$\text{رابطه ۱} \quad RWC = (fw - dw) / (tw - dw) \times 100$$

نشست الکترولیت

برای اندازه‌گیری نشست الکترولیت، پس از اتمام شرایط غرقاب (BBCH = 17)، نمونه برگی در لوله‌های آزمایش حاوی ده میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفتند و پس از گذشت ۲۴ ساعت، هدایت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه EC متر (CON 410) اندازه‌گیری شد (EC_۱^۵). برای محاسبه میزان کل نشست الکترولیت‌ها بر اثر مرگ سلول، لوله‌های آزمایش به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه بن‌ماری با دمای ۹۰ درجه قرار گرفتند و

¹ Relative Water Content

² Fresh Weight

³ Turgid Weight

⁴ Dry Weight

⁵ Electrical Conductivity

دندروگرام به‌دست‌آمده گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها را بر اساس شباهت‌های فیزیولوژیکی و زراعی آن‌ها در شرایط تنش غرقاب مشخص کرد.

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی عملکرد و پایداری ژنوتیپ‌های کلزا در شرایط مختلف غرقاب، از تحلیل GGE بای‌پلات با استفاده از نرم‌افزار GenStat (نسخه ۱۴) استفاده شد. در این تحلیل، اثرات ژنوتیپ (G) و برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط (GE) بر عملکرد ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بررسی شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی نشان دادند که اثر ساده ژنوتیپ و غرقاب بر تعداد برگ، ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، طول و حجم ریشه، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه، کلروفیل *a* و *b*، کاروتنوئید، عدد اسپد، محتوای نسبی آب برگ و نشت الکترولیت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. افزون بر این، برهم‌کنش ژنوتیپ و غرقاب بر همه صفات مذکور به‌جز طول ریشه معنی‌دار بود. این نتایج وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه بین ژنوتیپ‌ها و واکنش‌های متفاوت آن‌ها به تنش غرقاب را نشان می‌دهند (جدول ۳).

به‌ترتیب با استفاده از روابط ۳ تا ۷ محاسبه شدند (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).

$$\text{chl}_a (\mu\text{g/ml}) = 16.72 A_{665.2} - 9.16 A_{652.4} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\text{chl}_b (\mu\text{g/ml}) = 34.09 A_{652.4} - 15.28 A_{665.2} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{chl}_{a+b} (\mu\text{g/ml}) = \text{chl}_a + \text{chl}_b \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\text{chl}_{a/b} (\mu\text{g/ml}) = \text{chl}_a / \text{chl}_b \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\text{Carotenoid} (\mu\text{g/ml}) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$= ((1000 A_{470} - 1.63 \text{Chl}_a - 104.96 \text{Chl}_b) / 221)$$

تحلیل آماری

آنالیز واریانس داده‌ها و تجزیه خوشه‌ای به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴)، SPSS (نسخه ۲۲) و PAST (نسخه ۳/۵) انجام شد. میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفتند.

تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های کلزا با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بر پایه فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) و روش وارد (Ward's Method) انجام شد.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر ژنوتیپ و تنش غرقاب بر صفات مورفوفیزیولوژیکی در ژنوتیپ‌های مختلف براسیکا
Table 3. The analysis of variance (mean squares) for the effects of genotypes and flooding stress on morpho-physiological traits in different *Brassica* genotypes

منابع تغییرات (S.O.V)							درجه آزادی (df)
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	خطا Error	ژنوتیپ × غرقاب Genotype × Flooding	غرقاب Flooding	ژنوتیپ Genotype	بلوک Block	2	
10.34	0.284	1.031**	11.511**	3.073**	1.011*	تعداد برگ (Leaf number)	
4.24	1.312	6.158**	92.536**	1068.133**	5.036*	ارتفاع بوته (Plant height)	
7.33	0.039	0.087**	1.471**	0.995**	0.027 ^{ns}	قطر ساقه (Stem diameter)	
9.15	13.603	169.591**	6288.294**	4227.026**	100.122**	سطح برگ (Leaf area)	
5.470	0.513	0.716 ^{ns}	39.219**	16.843**	1.970*	طول ریشه (Root length)	
13.69	0.114	0.232**	1.931**	0.339**	0.775**	حجم ریشه (Root volume)	
13.49	0.0001	0.0003**	0.007**	0.008**	0.0001 ^{ns}	وزن خشک برگ (Leaf dry weight)	
12.17	0.00007	0.0003**	0.0008**	0.006**	0.0001 ^{ns}	وزن خشک ساقه (Stem dry weight)	
13.33	0.0008	0.001*	0.154**	0.104**	0.002 ^{ns}	وزن خشک ریشه (Root dry weight)	
13.48	0.188	0.375**	4.462**	4.466**	0.207 ^{ns}	کلروفیل <i>a</i> (Chlorophyll <i>a</i>)	
15.74	0.037	0.543**	1.980**	1.229**	0.391**	کلروفیل <i>b</i> (Chlorophyll <i>b</i>)	
20.21	0.024	0.155**	0.237**	0.381**	0.145**	کاروتنوئید (Carotenoid)	
6.94	5.991	15.309**	259.399**	140.990**	0.342 ^{ns}	عدد اسپد (SPAD value)	
7.67	37.113	258.422**	263.141**	518.311**	153.164*	محتوای نسبی آب برگ (Relative leaf water content)	
10.40	18.949	119.779**	2696.094**	652.193**	343.860**	نشت الکترولیت (Electrolyte leakage)	

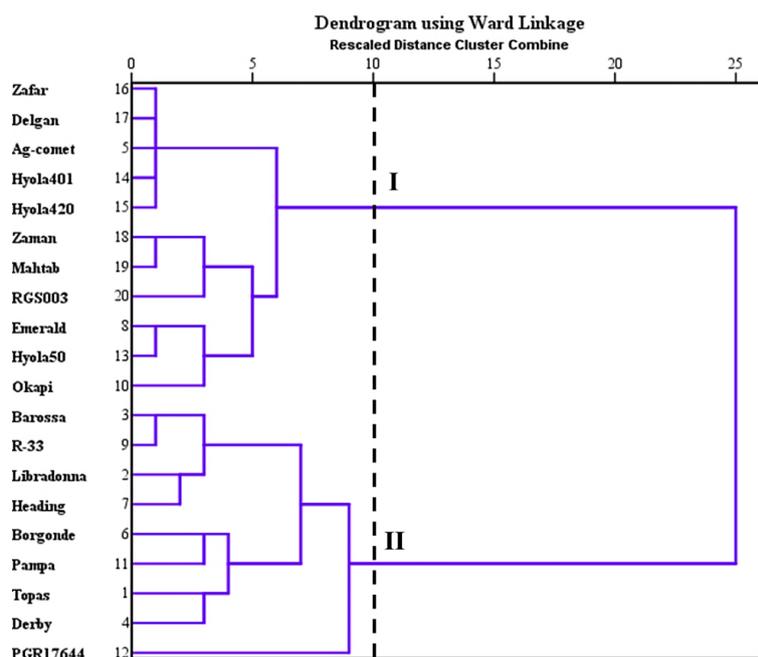
ns, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively. *ns و ** به‌ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد.

نتایج تجزیه خوشه‌ای در شرایط بدون تنش (با ضریب کوفتتیک ۰/۷۹) ژنوتیپ‌ها را به دو گروه تقسیم کرد. لامبدای ویلکس برای تابع اول معنی‌دار (۰/۰۰۲) (جدول ۴) و صحت گروه‌بندی ۱۰۰ درصد بود. گروه‌های حاصل به‌ترتیب شامل ۱۱ و ۹ ژنوتیپ بودند. گروه اول (I) شامل ژنوتیپ‌های ظفر، دلگان، آگ-کومت، هایولا ۴۰۱، هایولا ۴۲۰، زمان، مهتاب، آرچی‌اس، امرالد، هایولا ۵۰ و اکاپی و گروه دوم (II) شامل ژنوتیپ‌های باروسا، آر ۳۳، لیبرادونا، هیدینگ، بورگوندی، پامپا، توپاس، دیربی، پی‌جی‌آر بودند (شکل ۱).

غربالگری و گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مختلف جنس براسیکا بر اساس تحمل آن‌ها به شرایط غرقاب

در این مرحله، میزان تحمل ۲۰ ژنوتیپ جنس براسیکا نسبت به تنش غرقاب مورد بررسی قرار گرفت. ژنوتیپ‌ها در هر سطح تنش بر اساس صفات مورد بررسی در آزمایش به‌وسیله تجزیه خوشه‌ای گروه‌بندی شدند. روش گروه‌بندی واریانس مینیمم وارد به‌دلیل ارائه دندروگرام مناسب جهت برش و نیز مشخص نمودن گروه‌بندی مطلوب در همه سطوح مورد استفاده قرار گرفت.

گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها در سطح شاهد (بدون غرقاب)



شکل ۱- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های جنس براسیکا در شرایط بدون غرقاب به روش گروه‌بندی حداقل واریانس وارد (ضریب کوفتیک = ۰/۷۹)

Figure 1. The dendrogram obtained from the clusters of *Brassica* genotypes under non-flooded conditions using Ward's minimum variance method (cophenetic coefficient = 0.79).

جدول ۴- آزمون تابع تشخیص برای ژنوتیپ‌های جنس براسیکا در شرایط بدون غرقاب با استفاده از لامبدای ویلکس
Table 4. The discriminant function test for *Brassica* genotypes under non-flooded conditions using Wilks' lambda.

معنی‌داری Significant	درجه آزادی df	کای اسکوئر Chi-square	لامبدای ویلکس Wilks' Lambda	آزمون توابع Test of Function (s)
0.002	15	36.126	0.032	تابع اول

ذاتی رشد، کارایی فتوسنتزی و صفات ساختاری باشد که در به‌نژادی ژنوتیپ‌های براسیکا مورد توجه قرار می‌گیرند. یافته‌های پژوهش‌های پیشین نیز مؤید این نتیجه هستند. به‌عنوان نمونه، قنبری و همکاران (Ghanbari *et al.*, 2019) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های جنس براسیکا در شرایط بهینه، از نظر صفاتی همچون سطح برگ، شاخص سطح برگ و وزن خشک کل، دارای اختلاف معنی‌داری بودند که می‌تواند در ارزیابی توان تولید و پتانسیل عملکرد آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2016) به تفاوت‌های قابل توجهی در رشد رویشی و شاخص‌های فیزیولوژیکی از جمله میزان کلروفیل، وزن خشک ریشه و ظرفیت فتوسنتزی بین ژنوتیپ‌های مختلف جنس براسیکا در شرایط بدون تنش اشاره کردند. هم‌راستا با این یافته‌ها، مطالعه فرجی (Faraji *et al.*, 2015) نیز نشان داد که افزایش سطح برگ در گیاه کلزا، ارتباط مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه داشت.

مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفوفیزیولوژیک در شرایط بدون غرقاب

مقایسه میانگین صفات بین گروه‌های ایجادشده در سطح بدون غرقاب نشان داد که دو گروه از نظر صفات تعداد برگ، ارتفاع بوته، طول ریشه، حجم ریشه، کلروفیل *b*، محتوای نسبی آب برگ و نشت الکتروولت تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما از نظر سایر صفات مانند قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک اندام‌ها این تفاوت‌ها معنی‌دار بودند. بر اساس یافته‌ها، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل *a*، میزان کاروتنوئید و عدد اسید در گروه دوم نسبت به گروه اول به ترتیب حدود ۱۰، ۴۶، ۲۶، ۳۰، ۳۸، ۱۰، ۲۸، و ۳ درصد بیشتر بود (جدول ۵). بنابر این، گروه دوم در بیشتر صفات مورد مطالعه بهتر هستند و می‌توان آن را به‌عنوان گروه برتر در شرایط بدون غرقاب در نظر گرفت. این تفاوت‌ها بیانگر وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه میان ژنوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط بدون تنش هستند. چنین تفاوت‌هایی می‌تواند بازتابی از تفاوت در ظرفیت

جدول ۵- مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفولوژیک و رویشی ژنوتیپ‌های مختلف براسیکا در شرایط بدون غرقاب
Table 5. Mean comparisons between groups for morphological and vegetative traits of different *Brassica* genotypes under non-flooded conditions

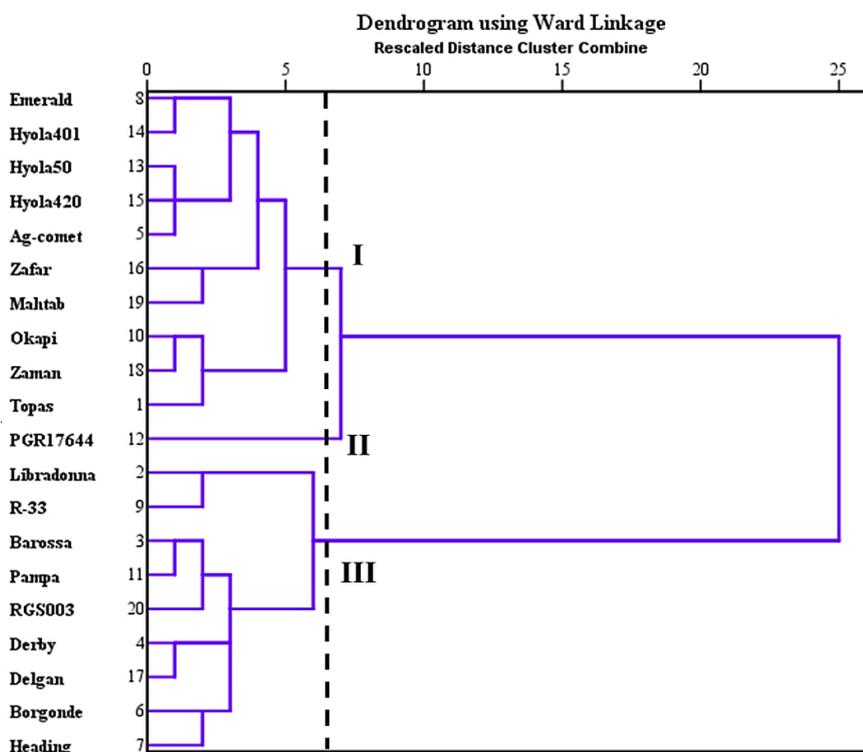
صفات مورفولوژیک و رویشی Morphological and Vegetative Traits						
گروه‌ها Groups	تعداد برگ (واحد در بوته) Leaf number (per plant)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm)	مساحت برگ (سانتی‌متر مربع) Leaf area (cm ²)	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)	حجم ریشه Root volume
						وزن خشک (میلی‌گرم در بوته) Dry weight (mg per plant)
						ریشه Root
						ساقه Stem
						برگ Leaf
I	5.485	27.576	2.675 ^b	38.405 ^b	13.515	2.659
II	5.519	28.389	2.952 ^a	56.162 ^a	13.907	2.546
معنی‌داری (Sig.)	ns	ns	**	**	ns	ns

صفات فیزیولوژیک Physiological Traits					
گروه‌ها Groups	کلروفیل (میکروگرم در میلی‌لیتر) Chlorophyll (µg/mL)		کاروتنوئید (میکروگرم در میلی‌لیتر) Carotenoid (µg/mL)	عدد اسپد SPAD value	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content (درصد) %
	<i>b</i>	<i>a</i>			نشست الکترولیت Electrolyte leakage
I	1.459	3.505 ^b	0.734 ^b	36.029 ^b	34.674
II	1.28	3.862 ^a	0.939 ^a	37.431 ^a	41.295
معنی‌داری (Sig.)	ns	*	*	*	ns

ns, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.
در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف یا حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.
The same letter(s) in each column indicate non-significant differences according to the LSD test at 5% of probability.

به ترتیب شامل ۱۰، ۱ و ۹ ژنوتیپ بودند. گروه اول (I) شامل ژنوتیپ‌های امرالد، هایولا ۴۰۱، هایولا ۵۰، هایولا ۴۲۰، آگ-کومت، ظفر، مهتاب، اکاپی، زمان، توپاس گروه دوم (II) شامل ژنوتیپ پی‌جی‌ار و گروه (III) شامل ژنوتیپ‌های لیبرادونا، آر ۳۳، باروسا، پامپا، آرچی‌اس، دربی، دلگان، بورگوندی و هیدینگ بودند (شکل ۲).

گروه‌بندی ارقام کلزا در تنش غرقاب متوسط
نتایج تجزیه خوشه‌ای در سطح غرقاب هشت روز (با ضریب کوفنتیک ۰/۶۹) ژنوتیپ‌ها را به سه گروه تقسیم کردند. لامبدای ویلکس برای تابع اول بر اساس تجزیه تابع تشخیص بسیار معنی‌دار (۰/۰۰) و برای تابع دوم معنی‌دار (۰/۰۱۱) (جدول ۶) و صحت گروه‌بندی ۱۰۰ درصد بود. گروه‌های حاصل



شکل ۲- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ارقام مختلف کلزا در شرایط تنش غرقاب متوسط به روش گروه‌بندی حداقل واریانس وارد (ضریب کوفنتیک ۰/۶۹)

Figure 2. The dendrogram obtained from the clusters of *Brassica* genotypes under moderate flooding using Ward's minimum variance method (cophenetic coefficient = 0.69).

جدول ۶- آزمون تابع تشخیص برای ژنوتیپ‌های جنس براسیکا در شرایط غرقاب متوسط با استفاده از لامبدای ویلکس
Table 6. The discriminant function test for *Brassica* genotypes under moderate flooding using Wilks' lambda

معنی‌داری Significant	درجه آزادی df	کای اسکور Chi-square	لامبدای ویلکس Wilks' Lambda	آزمون تابع Test of Function(s)
0.000	30	80.991	0.000	تابع اول از درون تابع دوم 1 through 2
0.011	14	28.963	0.055	تابع دوم 2

می‌تواند به معنی تحمل بهتر به شرایط غرقاب متوسط باشد. از نظر صفات فیزیولوژیک نیز گروه سوم به‌ویژه در کلروفیل *a* و محتوای نسبی آب برگ، وضعیت بهتری داشت. این نتیجه نشان‌دهنده بهبود فتوسنتز و مقاومت بهتر به تنش در ژنوتیپ‌های این گروه است. در همین راستا، تحقیقات نشان داده‌اند که ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک مانند سطح برگ، محتوای کلروفیل *a* و محتوای نسبی آب برگ می‌توانند نقش مهمی را در بهبود مقاومت گیاهان به شرایط غرقاب ایفا کنند. به‌ویژه، این صفات به گیاهان کمک می‌کنند تا در شرایط تنش، فتوسنتز را بهینه‌سازی کنند و مقاومت بیشتری را در برابر کمبود اکسیژن و تنش‌های محیطی نشان دهند (Sharma *et al.*, 2021). این یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش سطح برگ و کلروفیل ظرفیت جذب نور و تثبیت کربن را در شرایط تنش آبی یا غرقابی حفظ می‌کند (Gómez & Franco, 2017). همچنین، ژنوتیپ‌های مقاوم به غرقاب معمولاً با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و حفظ تعادل آب برگ، پایداری غشاء سلولی را تقویت می‌کنند و نشأت الکترولیت را کاهش می‌دهند (Manghwar *et al.*, 2024).

مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفوفیزیولوژیک در شرایط غرقاب متوسط

مقایسه میانگین صفات بین سه گروه ایجادشده در تنش غرقاب متوسط نشان داد که گروه‌ها از نظر تعداد برگ، قطر ساقه، طول و حجم ریشه و میزان کاروتنوئید تفاوت معنی‌داری نداشتند. از نظر سایر صفات این تفاوت‌ها معنی‌دار بودند. در صفات سطح برگ، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه، گروه سوم به‌ترتیب حدود ۲/۰۳، ۱/۴۵، ۱/۴۳ و ۱/۸۶ برابر از گروه اول و حدود ۱/۸۱، ۱/۵۵، ۱/۳۶ و ۲/۱۳ برابر از گروه دوم بیشتر بود. از نظر صفت ارتفاع بوته گروه دوم حدود دو برابر نسبت به گروه اول و سوم ارتفاع بیشتری داشت. صفات فیزیولوژیک کلروفیل *a*، عدد اسپد و محتوای نسبی آب به‌ترتیب در حدود ۲/۳، ۱/۲ و ۱/۷ برابر از گروه اول و در حدود ۵۶، ۱۲ و ۲۷ درصد از گروه دوم بیشتر بود. در مقایسه، کلروفیل *b* در گروه اول و سوم حدود ۷۲ و ۶۴ درصد نسبت به گروه دوم بیشتر بود. نشأت الکترولیت نیز در گروه دوم حدود ۴۶ و ۴۴ درصد نسبت به گروه اول و سوم بیشتر بود (جدول ۷).

گروه سوم به‌طور کلی در صفات رویشی مانند سطح برگ، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه برتری داشت. این برتری

جدول ۷- مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفولوژیک و رویشی ژنوتیپ‌های مختلف براسیکا در شرایط غرقاب متوسط
Table 7. Mean comparisons between groups for morphological and vegetative traits of different *Brassica* genotypes under moderate flooding

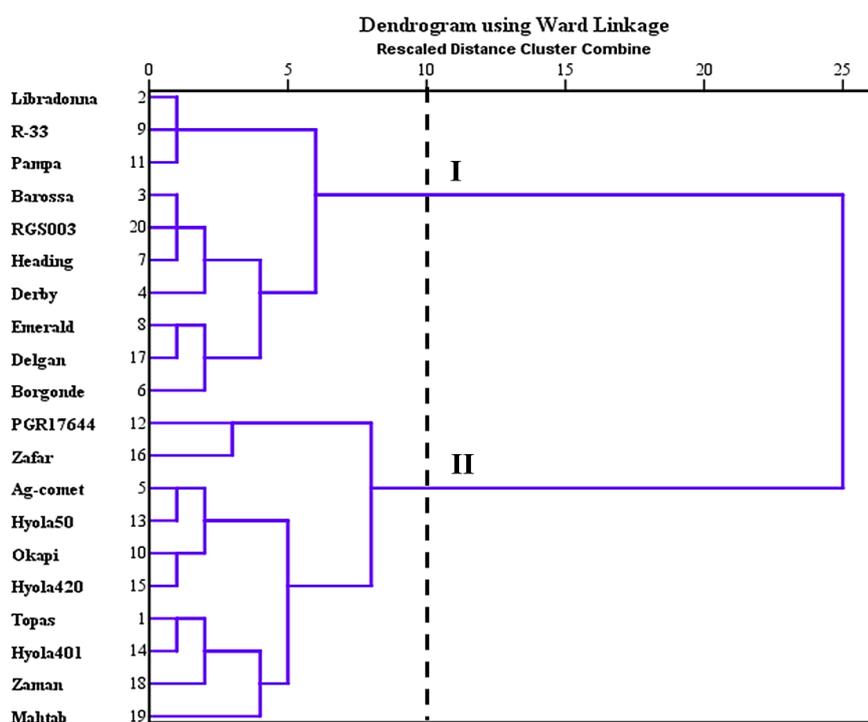
صفات مورفولوژیک و رویشی Morphological and Vegetative Traits									
گروه‌ها Groups	تعداد برگ (واحد در بوته) Leaf number (per plant)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm)	سطح برگ (سانتی‌متر مربع) Leaf area (cm ²)	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)	حجم ریشه Root volume	وزن خشک (میلی‌گرم در بوته) Dry weight (mg per plant)		
							برگ Leaf	ساقه Stem	ریشه Root
I	4.933	26.45 ^b	2.566	28.715 ^b	12.467	2.425	160 ^b	55 ^b	62 ^b
II	5.333	51.667 ^a	2.59	32.105 ^b	13	2.583	143 ^c	58 ^b	58 ^b
III	5.185	24.593 ^b	2.888	58.306 ^a	13.741	2.454	299 ^a	79 ^a	90 ^a
معنی‌داری Significance	ns	**	ns	**	ns	ns	**	*	**
صفات فیزیولوژیک Physiological Traits									
گروه‌ها Groups	کلروفیل (میکروگرم در میلی‌لیتر) Chlorophyll (µg/mL)		کاروتنوئید (میکروگرم در میلی‌لیتر) Carotenoid (µg/mL)	عدد اسپد SPAD value	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content (درصد) (%)	نشأت الکترولیت Electrolyte leakage			
	<i>b</i>	<i>a</i>							
I	3.338 ^a	1.258 ^a	0.696	35.233 ^b	78.069 ^a	39.65 ^b			
II	2.419 ^b	0.73 ^b	0.6	32.50 ^c	65.91 ^b	58.193 ^a			
III	3.785 ^a	1.201 ^a	0.834	36.011 ^a	84.053 ^a	40.241 ^b			
معنی‌داری Significance	**	**	ns	**	*	**			

ns, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف یا حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. The same letter(s) in each column indicate non-significant differences according to the LSD test at 5% of probability.

هر کدام شامل ۱۰ رقم بودند. در گروه اول (I) ژنوتیپ‌های لیبرادونا، آر۳۳، پامپا، باروسا، آر‌جی‌اس، هیدینگ، دربی، امرالد، دلگان، بورگوندی و در گروه دوم (II) ژنوتیپ‌های پی‌جی‌آر، ظفر، آگ-کامت، هایولا ۵۰، اکاپی، هایولا ۴۲۰، توپاس، ظفر، توپاس، هایولا ۴۰۱، زمان، مهتاب قرار گرفتند (شکل ۳).

گروه‌بندی ارقام کلزا در تنش غرقاب شدید نتایج تجزیه خوشه‌ای در سطح غرقاب ۱۶ روز (با ضریب کوفنتیک = ۰/۷۵) ژنوتیپ‌ها را به دو گروه تفکیک کردند. لامبدای ویلکس برای تابع اول بسیار معنی‌دار (۰/۰۰۶) (جدول ۸) و صحت گروه‌بندی ۱۰۰ درصد بودند. دو گروه حاصل



شکل ۳- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌ها در تنش غرقاب شدید به روش گروه‌بندی حداقل واریانس وارد (ضریب کوفنتیک = ۰/۷۵)

Figure 3. The dendrogram obtained from the clusters of *Brassica* genotypes under severe flooding using Ward's minimum variance method (cophenetic coefficient = 0.75).

جدول ۸- آزمون تابع تشخیص برای ژنوتیپ‌های جنس *Brassica* در شرایط غرقاب شدید با استفاده از لامبدای ویلکس
Table 8. The discriminant function test for *Brassica* genotypes under severe flooding using Wilks' lambda

معنی‌داری Significant	درجه آزادی df	کای اسکوئر Chi-square	لامبدای ویلکس Wilks' Lambda	آزمون توابع Test of Function(s)
0.006	15	32.02	0.05	تابع اول

از طرف دیگر، گروه دوم ارتفاع بوته بالاتری دارد و این تفاوت ممکن است به دلیل راهبردهای مختلف رشد در این گروه باشد. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2014) نشان دادند که وزن خشک گیاه تابعی از میزان تشعشع جذب شده در طول دوره رشد بود. از طرفی، میزان تشعشع جذب شده به وسیله گیاه بستگی کامل به شاخص سطح برگ و رشد تاج پوشش گیاه دارد. هرچه سطح برگ گیاه بیشتر باشد میزان وزن خشک بالاتر و مقاومت گیاه به شرایط تنش بیشتر می‌شود.

همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان یکی از معیارهای اندازه‌گیری واکنش گیاه به شرایط تنش است. محتوای نسبی آب برگ به‌طور مستقیم بیان‌کننده وضعیت آبی در گیاهان است (Anjum *et al.*, 2011). ناطقی و همکاران (Nateghi *et al.*, 2019) نیز بیان کردند که ارقام با کلروفیل *a* بیشتر توانایی تولید مواد پرورده بیشتری را دارند که در نهایت، منجر به افزایش مقاومت در شرایط تنش و افزایش عملکرد دانه می‌شود. مرادیگی (Moradbeigi 2020) نیز نشان داد که مناسب‌ترین و مقاوم‌ترین رقم مورد بررسی در شرایط مختلف آبیاری و تاریخ کاشت میزان محتوای نسبی آب برگ و کلروفیل *a* بیشتری داشت.

مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفوفیزیولوژیک جنس *Brassica* کلزا در تنش غرقاب شدید

مقایسه میانگین صفات مورفوفیزیولوژیک بین دو گروه در تنش غرقاب شدید نشان داد که ژنوتیپ‌ها از نظر صفات تعداد برگ، طول و حجم ریشه، عدد اسپد و نشت الکترولیت تفاوت معنی‌داری نداشتند. در مقایسه، در سایر صفات این تفاوت معنی‌دار بود. قطر ساقه، سطح برگ، و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه در گروه اول به ترتیب ۱/۱۱، ۲/۷، ۱/۶، ۱/۳۳ و ۱/۹۵ برابر بیشتر از گروه دوم بودند، در حالی که ارتفاع بوته در گروه دوم حدود ۲۱ درصد از گروه اول بیشتر بود. در صفات فیزیولوژیک نیز کلروفیل *a*، کاروتنوئید و محتوای نسبی آب برگ در گروه اول در حدود ۹، ۱۴ و ۱۲ درصد بیشتر از گروه دوم بود (جدول ۹).

با توجه به این نتایج، به نظر می‌رسد که گروه اول در برخی صفات مورفولوژیک (مانند وزن خشک برگ، ساقه و ریشه) و فیزیولوژیک (مانند کلروفیل *a* و کاروتنوئید)، عملکرد بهتری نشان داد. این نتایج نشان‌دهنده تحمل بیشتر در برابر تنش غرقاب شدید هستند. تحقیقات نشان داده‌اند که بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی و تعادل عناصر غذایی از راه‌کارهای مؤثر در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی محسوب می‌شود (Sajid *et al.*, 2020).

جدول ۹- مقایسه میانگین بین گروهی صفات مورفولوژیک و ریشی ژنوتیپ‌های مختلف براسیکا در شرایط غرقاب شدید
Table 9. Mean comparisons between groups for morphological and vegetative traits of different *Brassica* genotypes under severe flooding

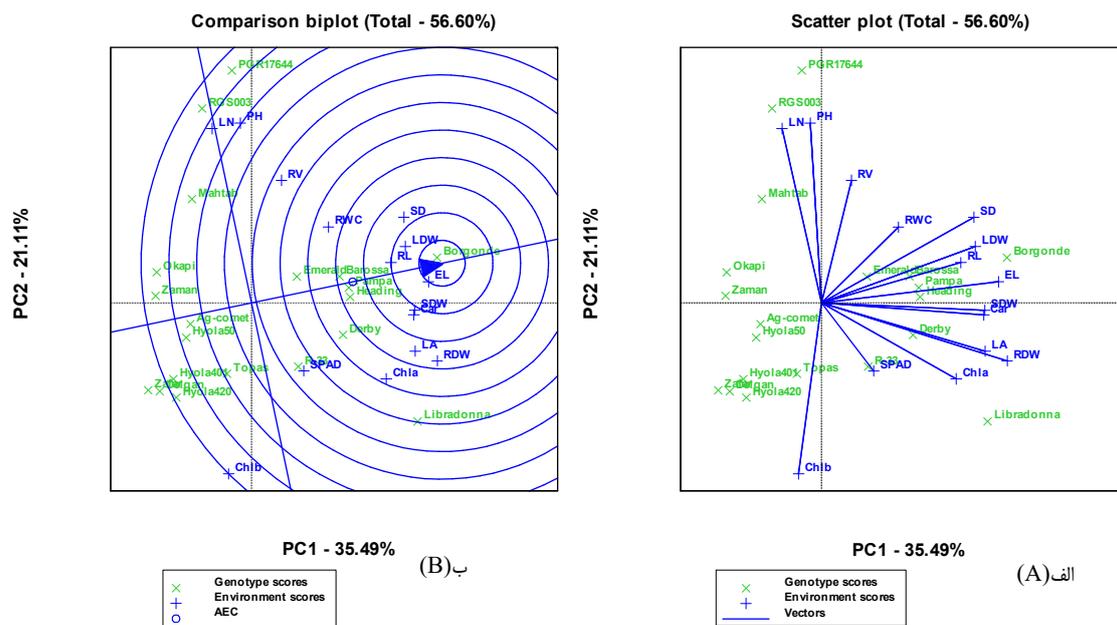
صفات مورفولوژیک و ریشی Morphological and Vegetative Traits									
وزن خشک (میلی‌گرم در بوته) Dry weight (mg per plant)			حجم ریشه Root volume	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)	سطح برگ (سانتی‌متر مربع) Leaf area (cm ²)	قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	تعداد برگ (واحد در بوته) Leaf number (per plant)	گروه‌ها Groups
ریشه Root	ساقه Stem	برگ Leaf							
249 ^a	72 ^a	85 ^a	2.375	13	47.138 ^a	2.728 ^a	23.667 ^b	4.967	I
123 ^b	54 ^b	53 ^b	2.342	12.1	17.456 ^b	2.431 ^b	28.733 ^a	4.833	II
**	**	**	ns	ns	**	**	**	ns	(Sig.)
صفات فیزیولوژیک Physiological Traits									
نشت الکترولیت Electrolyte leakage		محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content	عدد اسید SPAD value	کاروتنوئید (میکروگرم در میلی‌لیتر) Carotenoid (µg/mL)	کلروفیل (میکروگرم در میلی‌لیتر) Chlorophyll (µg/mL)		گروه‌ها Groups		
		(درصد) %			b	a			
45.494		78.762 ^a	33.997	0.793 ^a	1.046	3.435 ^a	I		
48.466		69.99 ^b	33.47	0.696 ^b	1.208	3.126 ^b	II		
ns		**	ns	*	ns	*	(Sig.)		

ns, * and ** Non-significant, Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.
در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف یا حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری یا یکدیگر ندارند.
The same letter(s) in each column indicate non-significant differences according to the LSD test at 5% of probability.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌وتحلیل نمودار بای‌پلات در شرایط شاهد (بدون غرقاب)، چهار ژنوتیپ بورگوندی، امرالد، پامپا وهیدینگ بهترین پاسخ را در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها نشان دادند. این ژنوتیپ‌ها از نظر ترکیب بهینه‌ای از داده‌های صفات وزن خشک اندام‌ها و قطر ساقه و پایداری مناسب در شرایط بدون تنش، در نزدیکی ژنوتیپ ایده‌آل قرار داشتند. به‌طور خاص، این ژنوتیپ‌ها کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و از نظر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها، بهتر بودند. این ویژگی‌ها بیانگر توانایی ذاتی این ژنوتیپ‌ها در بهره‌وری فتوسنتزی و تجمع زیست‌توده در شرایط عادی است که با یافته‌های پژوهشی قبلی هم‌راستا است (Silva-Pérez *et al.*, 2020). همچنین، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ژنوتیپ‌های پرمحصول در شرایط بدون تنش معمولاً دارای ساقه‌های قطورتر و ظرفیت ریشه‌ای توسعه‌یافته‌تری هستند که توان تأمین بهتر آب و مواد غذایی را فراهم می‌کند. علاوه‌براین، شاخص‌های مورفولوژیک پایدار مانند حجم ریشه و وزن خشک اندام‌های هوایی در کنار هم می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا مورد استفاده قرار گیرند (Zia *et al.*, 2020). در مقابل، ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها شامل هایولا ۴۰، هایولا ۴۲۰، توپاس و ظفر بودند که در مقایسه با این ارقام، فاصله بیشتری از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و در نمودار بای‌پلات در نواحی دورتر از مرکز دوایر متحدالمرکز قرار گرفتند.

تجزیه GGE بای‌پلات به‌منظور رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها و شناسایی میزان پایداری ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش غرقاب و بررسی تأثیر صفات در گزینش ژنوتیپ ایده‌آل و متحمل به تنش صورت گرفت. نتایج تجزیه در شرایط شاهد (صفر روز غرقاب) نشان دادند که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۳۵/۴۹ درصد و ۲۱/۱۱ درصد از کل واریانس موجود را تبیین کردند و مجموعاً ۵۶/۶ درصد از کل تغییرات را توضیح می‌دهند. این مقدار بیانگر آن است که این دو مؤلفه اصلی سهم قابل توجهی در تجزیه‌وتحلیل و تفکیک ژنوتیپ‌ها بر اساس ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک دارند (شکل ۴- الف).

در تجزیه بای‌پلات در سطح شاهد، صفات حجم ریشه، محتوای نسبی آب، قطر ساقه، وزن خشک برگ، نشت الکترولیت و طول ریشه به‌عنوان صفاتی با بالاترین بار عاملی در مؤلفه‌های اصلی اول و دوم شناسایی شدند. از میان این صفات، قطر ساقه و وزن خشک برگ بیشترین تأثیر را در تمایز ژنوتیپ‌ها داشتند و به‌طور معنی‌داری در تفکیک آن‌ها نقش ایفا کردند. نمودار بای‌پلات مقایسه‌ای (شکل ۴- ب) یک تجزیه‌وتحلیل گرافیکی است که در آن داده‌های چندبعدی در دو بعد اصلی به نمایش درمی‌آیند تا مقایسه‌های بصری انجام شوند. در این نمودار، دو مؤلفه اصلی که بیشترین واریانس را توجیه می‌کنند به‌عنوان محورها در نظر گرفته شدند. ژنوتیپ ایده‌آل، ژنوتیپی است که هم پایداری بالا و هم میانگین داده‌های صفات بالا دارد و در مرکز دوایر متحدالمرکز نمودار بای‌پلات قرار می‌گیرد (Yan & Kang, 2002). در این نمودار، هر ژنوتیپی که کمترین فاصله را با ژنوتیپ ایده‌آل داشته باشد، به‌عنوان بهترین ژنوتیپ معرفی می‌شود.

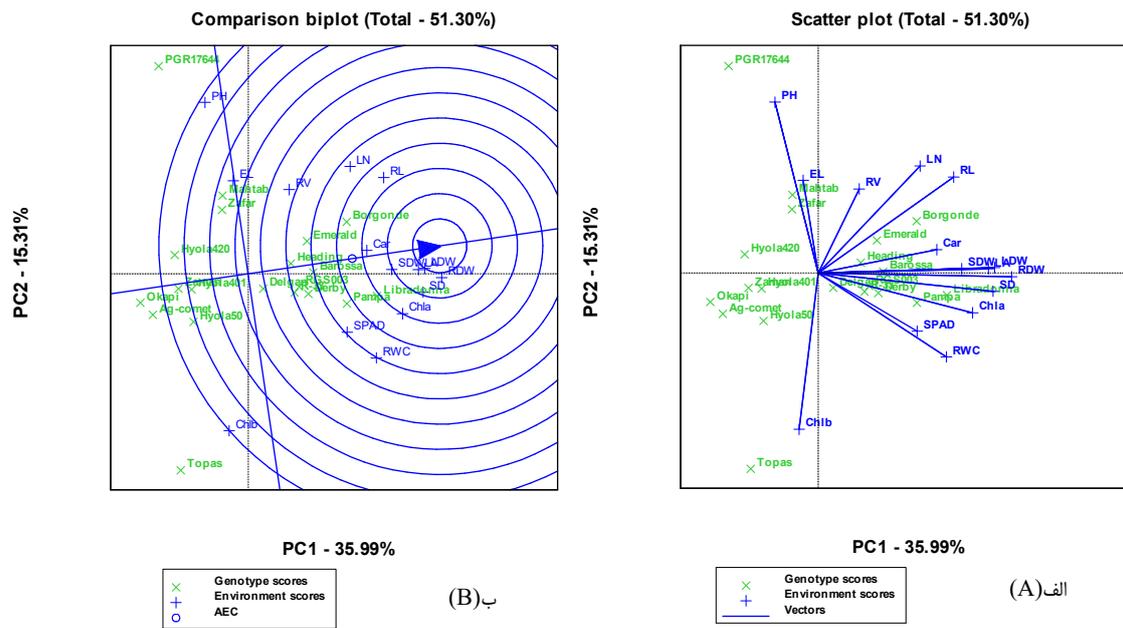


شکل ۴- نمودار بای‌پلات سطح بدون تنش غرقاب (الف-ب). صفات شامل EL: نشت الکترولیت، RWC: محتوای نسبی آب، SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، LN: تعداد برگ، LDW: وزن خشک برگ، RDW: عدد کلروفیل متر، SPAD: سطح برگ، LA: حجم ریشه، RV: ریشه، RVC: کلروفیل *a*، Chlb: کلروفیل *b*، Car: کاروتنوئید، Car: کاروتنوئید، SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، LN: تعداد برگ، LDW: وزن خشک برگ، RDW: عدد کلروفیل متر، SPAD: سطح برگ، LA: حجم ریشه، RV: ریشه، RVC: کلروفیل *a*، Chlb: کلروفیل *b*، Car: کاروتنوئید

Figure 4. The non-flooded conditions biplot (A-B). Traits include EL: Electrolyte Leakage, RWC: Relative Water Content, SD: Stem Diameter, PH: Plant Height, LN: Leaf Number, LDW: Leaf Dry Weight, RDW: Root Dry Weight, SDW: Stem Dry Weight, RL: Root Length, RV: Root Volume, LA: Leaf Area, SPAD: Chlorophyll Meter Reading, Chla: Chlorophyll *a*, Chlb: Chlorophyll *b*, Car: Carotenoid.

بالای وزن خشک اندام‌های هوایی و زیرزمینی و پایداری مناسب در شرایط تنش، به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر شناخته شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که ژنوتیپ‌های مقاوم به غرقاب معمولاً با حفظ تولید ماده خشک، رشد ریشه و ساقه و تنظیم مناسب تعادل هورمونی، آسیب ناشی از کمبود اکسیژن را کاهش می‌دهند (Olorunwa *et al.*, 2023). علاوه بر این، مشخص شده است که افزایش وزن خشک ساقه و برگ در شرایط غرقاب با توسعه سیستم ریشه‌ای همراه است که نقش مهمی را در فراهمی اکسیژن و جذب بهتر آب و مواد غذایی ایفا می‌کند (Ghazi *et al.*, 2022). بنابر این، ژنوتیپ‌هایی که در بای‌پلات کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل دارند، علاوه بر عملکرد بالاتر، از سازوکارهای فیزیولوژیکی مؤثرتر برای مقابله با تنش غرقاب بهره‌مند هستند که می‌تواند به‌عنوان شاخص انتخاب در برنامه‌های اصلاحی مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر، ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها شامل توپاس، پی‌جی‌ار، اکاپی و آگ-کومت بودند. این ژنوتیپ‌ها فاصله زیادی از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و در نمودار بای‌پلات در نواحی دورتر از مرکز دایره متحد‌المركز قرار گرفتند که نشان‌دهنده داده‌های صفات پایین‌تر و پایداری ضعیف‌تر این ژنوتیپ‌ها در شرایط غرقاب است.

نتایج تحلیل GGE بای‌پلات در شرایط تنش غرقاب (هشت روز) نشان دادند که دو مؤلفه اصلی به‌ترتیب ۳۵/۹۹ درصد و ۱۵/۳۱ درصد از کل واریانس داده‌ها را توضیح دادند و در مجموع ۵۱/۳ درصد از تغییرات کل را پوشش می‌دهند (شکل ۵-الف). این میزان از توضیح واریانس نشان‌دهنده اهمیت بالای این دو مؤلفه در تفکیک ژنوتیپ‌ها بر اساس صفات مورفوفیزیولوژیکی است. صفات تأثیرگذار در این سطح از تنش شامل وزن خشک ساقه، برگ و ریشه، قطر ساقه، کاروتنوئید، طول ریشه، تعداد برگ و حجم ریشه بودند. از این میان، سه صفت اول یعنی وزن خشک ساقه، برگ و ریشه به‌طور برجسته‌ای در تمایز ژنوتیپ‌ها نقش داشتند و تأثیر بیشتری در تفکیک آن‌ها در نمودار بای‌پلات ایفا کردند (شکل ۵-ب). در تحلیل نمودار بای‌پلات مقایسه‌ای برای شرایط تنش غرقاب متوسط، چهار ژنوتیپ لیبرادونا، بورگوندی، پامپا و هیدینگ در مقایسه با دیگر ارقام، بهتر بودند. این ژنوتیپ‌ها از لحاظ ترکیب بهینه‌ای از صفات وزن خشک اندام‌ها و پایداری در شرایط غرقاب، در نزدیکی ژنوتیپ ایده‌آل قرار داشتند. به‌ویژه، این ارقام کمترین فاصله را از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و از نظر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها، عملکرد بهتری از خود نشان دادند و به‌دلیل مقادیر

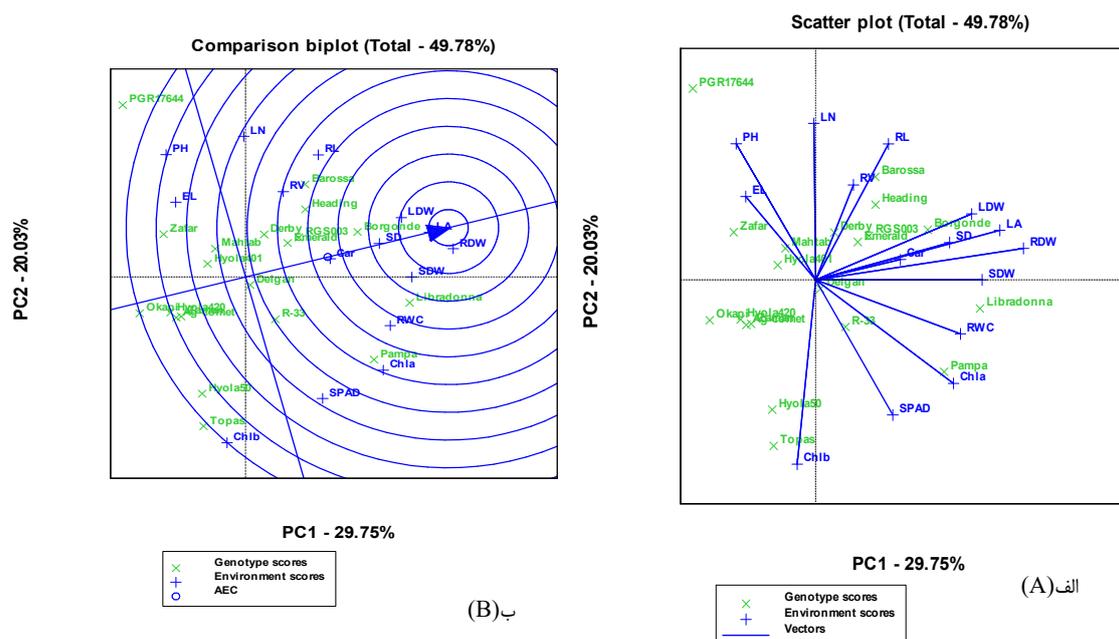


شکل ۵- نمودار بای پلات تنش غرقاب متوسط (الف-ب). صفات شامل EL: نشت الکترولیت، RWC: محتوای نسبی آب، SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، LN: تعداد برگ، LDW: وزن خشک برگ، RDW: وزن خشک ریشه، SDW: وزن خشک ساقه، RL: طول ریشه، RV: حجم ریشه، LA: سطح برگ، SPAD: عدد کلروفیل متر، Chla: کلروفیل a، Chlb: کلروفیل b، Car: کاروتنوئید

Figure 5. The moderate flooding stress biplot (A-B). Traits include EL: Electrolyte Leakage, RWC: Relative Water Content, SD: Stem Diameter, PH: Plant Height, LN: Leaf Number, LDW: Leaf Dry Weight, RDW: Root Dry Weight, SDW: Stem Dry Weight, RL: Root Length, RV: Root Volume, LA: Leaf Area, SPAD: Chlorophyll Meter Reading, Chla: Chlorophyll a, Chlb: Chlorophyll b, Car: Carotenoid.

شرایط غرقاب شدید، ژنوتیپ‌های بورگوندی و لیبرادونا از لحاظ صفات مذکور بهترین عملکرد را نشان دادند. این یافته‌ها اهمیت توانایی حفظ زیست‌توده و استمرار عملکرد فتوسنتزی در مواجهه با تنش طولانی‌مدت غرقاب را نشان می‌دهند (Pan *et al.*, 2021). نتایج پژوهش‌ها بیان می‌کنند که مقاومت به غرقاب شدید با توسعه حجم ریشه و حفظ ساختار سطح برگ مرتبط است که منجر به بهبود تبادل گازی و کاهش هیپوکسی می‌شود (Zhang *et al.*, 2023). در مقابل، ضعیف‌ترین ژنوتیپ‌ها شامل توپاس و پی‌جی‌ار بودند که در مقایسه با این دو ژنوتیپ، فاصله بیشتری از ژنوتیپ ایده‌آل داشتند و در نمودار بای پلات در نواحی دورتر از مرکز دوایر متحدالمرکز قرار گرفتند.

نتایج تجزیه GGE بای پلات در شرایط غرقاب شدید (۱۶ روز) نشان دادند که مؤلفه‌های اصلی به ترتیب ۲۹/۵۷ و ۲۰/۰۳ درصد از کل واریانس موجود را تبیین کردند و مجموعاً ۴۹/۷۸ درصد از کل تغییرات را توضیح می‌دهند (شکل ۶- الف). این مقدار نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این دو مؤلفه در تجزیه و تحلیل و تفکیک ژنوتیپ‌ها بر اساس ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک است. در تجزیه بای پلات سطح غرقاب ۱۶ روز، صفات تأثیرگذار شامل وزن خشک (ساقه، ریشه و برگ)، سطح برگ، قطر ساقه، طول و حجم ریشه بودند. در این میان، سه صفت اول یعنی وزن خشک ریشه، سطح برگ و وزن خشک برگ بیشترین تأثیر را در تمایز ژنوتیپ‌ها داشتند و به‌طور معنی‌داری در تفکیک آن‌ها نقش ایفا کردند. (شکل ۶- ب). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل نمودار بای پلات مقایسه‌ای در



شکل ۶- نمودار بای‌پلات تنش غرقاب شدید (الف-ب). صفات شامل EL: نشت الکترولیت، RWC: محتوای نسبی آب، SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، LN: تعداد برگ، LDW: وزن خشک برگ، RDW: وزن خشک ریشه، SDW: وزن خشک ساقه، RL: طول ریشه، RV: حجم ریشه، LA: سطح برگ، SPAD: عدد کلروفیل متر، Chla: کلروفیل a، Chlb: کلروفیل b، Car: کاروتنوئید

Figure 6. The severe flooding stress biplot (A-B). Traits include EL: Electrolyte Leakage, RWC: Relative Water Content, SD: Stem Diameter, PH: Plant Height, LN: Leaf Number, LDW: Leaf Dry Weight, SDW: Stem Dry Weight, RDW: Root Dry Weight, RL: Root Length, RV: Root Volume, LA: Leaf Area, SPAD: Chlorophyll Meter Reading, Chla: Chlorophyll a, Chlb: Chlorophyll b, Car: Carotenoid.

وزن خشک ریشه ($r=0.73^{**}$) و سطح برگ ($r=0.58^{**}$) بیشترین ضریب همبستگی را با وزن خشک نشان دادند. بر اساس نتایج، صفات ساختاری نظیر قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک ریشه می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های مؤثر در مقاومت به غرقاب مورد استفاده قرار گیرند. در مقابل، صفاتی نظیر ارتفاع بوته، کلروفیل *b* و نشت الکترولیت فاقد همبستگی معنی‌داری با وزن خشک برگ بودند و در برخی موارد، به‌ویژه تحت شرایط غرقاب متوسط و شدید، همبستگی منفی نیز از خود نشان دادند (جدول ۱۰)

برای بررسی ارتباط بین صفات مختلف گیاه کلزا و وزن خشک برگ تحت سطوح مختلف غرقاب، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. نتایج همبستگی نشان می‌دهند که برخی صفات ساختاری نقش مهمی در مقاومت گیاه به تنش غرقاب دارند. در میان صفات مورد بررسی، قطر ساقه، وزن خشک ساقه، سطح برگ و وزن خشک ریشه دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با وزن خشک برگ بودند. در سطح تنش غرقاب متوسط، بیشترین همبستگی مربوط به قطر ساقه، وزن خشک ریشه و ساقه به ترتیب با ($r=0.73^{**}$)، ($r=0.71^{**}$) و ($r=0.65^{**}$) مشاهده شد. همچنین در شرایط غرقاب شدید،

جدول ۱۰- همبستگی بین وزن خشک برگ با برخی صفات مورفوفیزیولوژیک کلزا در سطوح مختلف غرقاب ($n = 20$)

Table 10. Correlation coefficients between leaf dry weight and some morphophysiological traits of canola under different flooding levels ($n = 20$)

غرقاب شدید Severe flooding	غرقاب متوسط Moderate flooding	بدون غرقاب No Flooding	متغیر Parameter
0.51*	0.72**	0.59**	قطر ساقه (Stem diameter)
0.27	0.49*	0.43	طول ریشه (Root length)
0.23	0.20	0.29	حجم ریشه (Root volume)
0.16	-0.12	0.11	ارتفاع بوته (Plant height)
-0.03	0.38*	0.19	تعداد برگ (Leaf number)
0.55*	0.65**	0.55*	وزن خشک ساقه (Stem dry weight)
0.73**	0.71**	0.53*	وزن خشک ریشه (Root dry weight)
0.58**	0.50*	0.44	سطح برگ (Leaf area)
-0.14	0.36*	0.12	عدد اسپد (SPAD reading)
0.11	0.48*	0.28	کلروفیل a (Chlorophyll a)
-0.26	-0.02	-0.14	کلروفیل b (Chlorophyll b)
0.21	0.46*	0.55*	کاروتنوئید (Carotenoid)
0.30	0.40*	0.31	محتوای نسبی آب (Relative water content)
-0.15	-0.05	0.52*	نشت الکترولیت (Electrolyte leakage)

ns, * and ** به ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

نتیجه گیری کلی

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش غرقاب تأثیر منفی بر صفات اندازه گیری شده در ژنوتیپ‌های مختلف جنس براسیکا داشت. تنش غرقاب موجب افزایش میزان نشت الکترولیت، کاهش محتوای نسبی آب، میزان کلروفیل و وزن خشک اندام‌ها گردید. همچنین، تنوع قابل ملاحظه‌ای بین گونه‌های جنس براسیکا از نظر صفات مورفوفیزیولوژیک و تحمل به تنش غرقاب وجود دارد که می‌توان از ژنوتیپ‌های برتر در اصلاح نباتات به منظور افزایش تحمل ارقام کلزا استفاده کرد. بررسی روابط بین صفات مورفوفیزیولوژیکی امکان شناسایی بهترین ژنوتیپ‌ها را بر اساس این داده‌ها فراهم ساخت. با توجه به نتایج تجزیه گرافیکی بای‌پلات، سه صفت وزن خشک برگ، سطح برگ و وزن خشک ریشه به‌عنوان نشانگرهای مورفوفیزیولوژیکی برای شناسایی لاین‌های

متحمل به تنش غرقاب شناسایی شدند. با توجه به این که در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر برای محیط‌های مختلف علاوه بر عملکرد صفات، پایداری نیز حائز اهمیت است، ژنوتیپ‌های بورگوندی از گونه *B. junce* و لیبرادونا از گونه *B. napus* به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر در شرایط تنش غرقاب و ژنوتیپ‌های توپاس از گونه *B. napus* و پی‌جی‌ار از گونه *B. rapa* به‌عنوان ژنوتیپ حساس برای مطالعات و پژوهش‌های تکمیلی پیشنهاد می‌شوند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و شرکت توسعه کشت دانه‌های روغنی مازندران انجام شده است که به‌این‌وسیله قدردانی می‌گردد.

References

- Ahmadi Malek, A., & Kashani Farhangian, M. (2010). Effects of waterlogging stress on morphological parameters of pepper plants. *Journal of Plant Physiology*, 167(3), 201–2089. [In Persian]
- Ahmadi, B., Shirani Rad, A. H., & Khorgami, A. (2014). The effect of plant population densities and cultivars on forage yield, qualitative traits, and growth indices in canola forage (*Brassica napus* L.). *European Journal of Zoological Research*, 3, 62-70.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026-2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>
- Babaeian, M., Kheirkhah, M., Ghorbanzadeh, M., & Jafarian, M. (2021). Environmental hazards and energy flow in rapeseed agroecosystem: Case study: North Khorasan. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(4), 325-339. <https://doi.org/20.1001.1.24764310.1400.31.4.21.5> [In Persian].
- Bange, M. P., Milroy, S. P., & Thongbai, P. (2004). Growth and yield of cotton in response to waterlogging. *Journal of Field Crops Research*, 88, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.12.002>
- Emamian Tabarestani, M., Pirdashti, H. A., Tajik Ganbari, M. A., & Sadeghzadeh, F. (2019). Quantification of the effect of symbiosis with *Piriformospora indica* and *Trichoderma longibrachiatum* on some growth and physiological traits of canola under lead stress. *Journal of Field Crop Production*, 12(3), 139-156. [in Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1398.12.3.9.1>
- Faraji, A. (2015). Leaf area development in canola (*Brassica napus* L.) and its relation with seed yield under rainfed and supplemental irrigation conditions. *Yasouj University Journal of Agricultural Sciences*, 1(2), 13-25. [In Persian]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Rapeseed - Production (tonnes)*. FAO. Retrieved March 23, 2025, from <https://ourworldindata.org/agricultural-production>
- Foroughi, L., & Galeshi, S. A. (2007). Evaluation of morphological and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under waterlogging stress conditions and their relationship with grain yield. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 15(3), 831-846. <https://doi.org/10.22077/escs.2022.3084.1792>
- Ghanbari, A., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Zand, E. (2019). Evaluation of morphological and physiological traits of canola cultivars under non-stress conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, 8(2), 115–130. <https://doi.org/10.22067/jcpp.v8i2.77086> [In Persian].
- Ghasem Beigi, T., Majidian, P., Rameh, V. A., Gharami, M., & Masoudi, B. (2020). The management of sulfur application on some morphological traits and yield of the promising line L17 of rapeseed. *Journal of Crop Plant Improvement*, 12(36), 205-215 <http://dx.doi.org/10.52547/jcb.12.36.205> [In Persian]
- Ghazi, R., Nejad Sadeghi, L., Mahdi Khanlu, K., & Nabati Ahmadi, D. (2022). Evaluation of three commercial sugarcane varieties for tolerance to waterlogging stress at early growth stages in greenhouse conditions. *Journal of Crop Breeding (Eslahe Giyahan)*, 14(42), 197–210. <https://doi.org/10.52547/jcb.14.42.197>. [In Persian]
- Gomathi, R., Gururaja Rao, P. N., Chandran, K., & Selvi, A. (2015). Adaptive responses of sugarcane to waterlogging stress: An overview. *Sugar Tech*, 17(4), 325–338. <http://dx.doi.org/10.1007/s12355-014-0319-0>
- Gómez, J. D., & Franco, J. A. (2017). Photosystem II fluorescence and growth in cabbage plants (*Brassica oleracea* var. Capitata) grown under waterlogging stress. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 321–328. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.390>

- Harirforoush, M., Besharati, H., & Pirdashti, H. (2019). Effect of potassium nitrate and putrescine on some growth characteristics of rapeseed under waterlogging stress. *Journal of Iranian Society for Plant Physiology*, 9(4), 2923–2932.
- Hong, B., Zhou, B., Zhao, D., Liao, L., Chang, T., Wu, X., Wu, J., Yao, M., Chen, H., Mao, J., Guan, C., & Guan, M. (2024). Yield, cell structure and physiological and biochemical characteristics of rapeseed under waterlogging stress. *BMC Plant Biology*, 24, Article 941. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04175-5>
- Imantalab, A., Hazrati, S., & Pasban Islam, B. (2024). Evaluation of morphological and physiological traits in some promising rapeseed genotypes under saline soils. *Journal of Crop Breeding*, 14, 118–135. <https://doi.org/10.22092/cbj.2024.364910.1087>. [In Persian]
- Khadempir, M., Galeshi, S. A., Soltani, E., Qadari Far, F., & Mazlumi, M. (2014). The effect of temperature and waterlogging on growth and physiological activities of canola seedlings. *Scientific Journal of Agricultural Plant Physiology*, 6(22), 69–88 <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008403.1393.6.22.5.7> [In Persian]
- Kuai, J. X., Xie, Y., Li, Z., Wang, B., & Zhou, G. (2020). Leaf characteristics at recovery stage affect seed oil and protein content under the interactive effects of nitrogen and waterlogging in rapeseed. *Agriculture Journal*, 10(6), 207. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060207>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4.3.1-F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1995). Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, 46(12), 1843–1852. <https://doi.org/10.1093/jxb/46.12.1843>
- Manghwar, H., Hussain, A., Alam, I., Khoso, M. A., Ali, Q., & Liu, F. (2024). Waterlogging stress in plants: Unraveling the mechanisms and impacts on growth, development, and productivity. *Environmental and Experimental Botany*, 212, 105824. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105824>
- Moradbeigi, L. (2020). Investigating the effect of sowing date, irrigation, and autumn varieties of canola on yield and oil-related traits under drought stress conditions (Ph.D. dissertation). Shahrood University of Technology, Agricultural Engineering [In Persian]
- Moradbeigi, L., Gholami, A., Shirani-Rad, A. H., Abbasdokht, H., & Asghari, H. R. (2019). Effect of drought stress and delayed cultivation on grain yield, oil yield, and fatty acids composition in canola. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(2), 135–151 [In Persian]
- Mo'tamedi, M., & Bani Saeedi, A. (2022). Evaluation of yield, some physiological characteristics, and drought tolerance of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) in Khuzestan province. *Plant Production Science*, 12(1), 153–171. <https://doi.org/10.2/jpps.2023.702374> [In Persian]
- Nateghi, P., Hosseinzadeh, A., & MirAhmadi, M. (2019). The effect of sowing date on ecophysiological traits of new canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Agroecology*, 11(1), 261–276.
- Nath, U. K., Kim, H. T., Khatun, K., Park, J. I., Kang, K. K., & Nou, I. S. (2016). Modification of fatty acid profiles of rapeseed (*Brassica napus* L.) oil for using as food, industrial feedstock, and biodiesel. *Plant Breeding and Biotechnology*, 4(2), 123–134. <https://doi.org/10.9787/PBB.2016.4.2.123>
- Nooryazdan, H. (2024). Evaluation of grain yield of some wheat cultivars using drought tolerance indices. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 3(2), 325–345. <https://doi.org/10.22126/cbb.2024.11052.1081> [In Persian]
- Olorunwa, O. J., Adhikari, B., Brazel, S., Bheemanahalli, R., Barickman, T. C., & Reddy, K. R. (2023). Waterlogging stress reduces cowpea (*Vigna unguiculata* L.) genotypes growth, seed yield, and quality at different growth stages: Implications for developing tolerant cultivars under field conditions. *Agricultural Water Management*, 290, 108336. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108336>
- Pan, J., Sharif, R., Xu, X., & Chen, X. (2021). Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: Research progress and prospects. *Frontiers in Plant Science*, 11, 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>
- Raboanatahiry, N., Li, H., Yu, L., & Li, M. (2021). Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, utilization, and genetic improvement. *Agronomy*, 11(9), 1776. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776>
- Ren, B., Zhang, J., Li, X., Fan, X., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2014). Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(1), 23–31. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-175>
- Ritchie, S. W., Nguyen, H. T., & Holaday, A. S. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30(1), 105–111. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
- Rosouli, F., Galashi, S. A., Pirdashti, H. A., & Zinli, A. (2011). The effect of waterlogging stress on root and shoot growth in canola (*Brassica napus* L.). *First National Conference on Strategies for Achieving Sustainable Agriculture*, 6 pp [In Persian]
- SadrAbadi Haghghi, R. (2023). The effect of different levels of bentonite sulfur on the yield and yield components of canola. *Iranian Agricultural Research*, 10(4), 781–788 <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i4.20389> [In Persian]

- Sajid, H., Mustafa, A., Niamat, B., Ahmad, Z., Yaseen, M., Kamran, M., Rafique, M., Ahmar, S., & Chen, J. T. (2020). Alleviation of salinity-induced oxidative stress, improvement in growth, physiology, and mineral nutrition of canola (*Brassica napus* L.) through calcium-fortified composted animal manure. *Sustainability*, *12*(1), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su12010017>
- Sharma, S., Sharma, J., Soni, V., Kalaji, H. M., & Elsheery, N. I. (2021). Waterlogging tolerance: A review on regulative morpho-physiological homeostasis of crop plants. *Journal of Water and Land Development*, *49*(IV-VI), 16–28. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137092>
- Silva-Pérez, V., De Faveri, J., Molero, G., Deery, D. M., Condon, A. G., Reynolds, M. P., Evans, J. R., & Furbank, R. T. (2020). Genetic variation for photosynthetic capacity and efficiency in spring wheat. *Journal of Experimental Botany*, *71*(7), 2299–2311. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz439>
- Xu, M., Ma, H., Zeng, L., Cheng, Y., Lu, G., Xu, J., Zhang, X., & Zou, X. (2015). The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. *Field Crops Research*, *180*, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.06.007>
- Yan, W., & Kang, M. S. (2002). GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. *CRC Press*.
- Zhang, H., Irving, L. J., McGill, C., Matthew, C., Zhou, D., & Kemp, P. (2016). The effects of salinity and osmotic stress on *Brassica napus* physiology and yield. *Plant and Soil*, *407*(1–2), 285–301. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2939-3>
- Zhang, X., Jia, Q., Jia, X., Li, J., Sun, X., Min, L., Liu, Z., Ma, W., & Zhao, J. (2025). Brassica vegetables— an undervalued nutritional goldmine. *Horticulture Research*, *12*(2), uhae302. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae302>
- Zhang, Y., Chen, X., Geng, S., & Zhang, X. (2023). A review of soil waterlogging impacts, mechanisms, and adaptive strategies. *Environmental and Experimental Botany*, *201*, Article 105074. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105074>
- Zhu, B., Yu, J., & Shi, H. (2023). Effects of waterlogging stress on rapeseed yield, oil content, fatty acid composition, and transcriptome differences. *Plant Growth Regulation*, *101*, 769–779. <http://dx.doi.org/10.1007/s10725-023-01055-4>
- Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2020). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, *239*, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>