Iranian Journal of Seed Research

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

Yasouj University

Screening of *Nigella sativa* Genotypes for Drought Stress Tolerance at Germination Stage Using Multivariate Analysis

Akram Oraki [1], **Ehsan Shahbazi** [2] ✉, **Keramatollah Saeidi** [3] and **Fariba Rafiei** [4]

1. PhD Student of Plant Genetic and Breeding, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: oraki_a@yahoo.com
2. Corresponding author, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: eh_shahbazi@sku.ac.ir
3. Department of Horticulture Science, College of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: saeedi@sku.ac.ir
4. Corresponding author, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: Fariba.rafiei@sku.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 23 December 2025
Received in revised form 1 March 2026
Accepted 11 March 2026
Available online 20 March 2026

Keywords:

Black cumin (*Nigella sativa*)
Cluster analysis
Drought stress
Germination
Principal component analysis

ABSTRACT

Objective: This study evaluated the effects of polyethylene glycol (PEG)-induced drought stress on germination traits, seedling growth, and seed vigor across 24 *Nigella sativa* genotypes to identify drought-tolerant and -sensitive genotypes.

Method: The experiment was a factorial arrangement based on a completely randomized design (CRD) with three replications, conducted at the Crop Physiology Laboratory of Shahrekord University. The factors comprised 24 *N. sativa* genotypes and five drought levels induced by PEG at osmotic potentials of 0 (distilled water, control), -0.2, -0.3, -0.4, and -0.6 MPa. Measured traits included germination percentage and rate, mean germination time, root and shoot length, seedling length, seedling fresh and dry weight, and seed vigor.

Results: Analysis of variance (ANOVA) revealed that genotype, drought, and their interaction significantly affected all germination and early seedling growth traits. The strongest positive correlations were observed between seed vigor and seedling length, seedling length and root length, and seed vigor and root length. Principal component analysis (PCA) of the nine traits identified three components with eigenvalues >1, accounting for 87.91% of the total variance. Based on the PCA biplot and Ward's hierarchical cluster analysis, the genotypes were classified into three groups: tolerant (genotypes 3, 8, 11, 24), semi-tolerant (genotypes 1, 2, 9, 12, 14, 17), and sensitive (the remaining 14). Multivariate tests (Pillai's trace, Wilks' lambda, Hotelling-Lawley trace, and Roy's largest root) confirmed highly significant differences among the three groups ($p < 0.01$), validating the classification robustness.

Conclusions: The findings reveal significant genetic diversity among *N. sativa* genotypes under drought stress. Genotypes 3, 8, 11, and 24, which showed superior germination performance, are recommended for future breeding programs. Furthermore, clustering enables the selection of parental lines with greater genetic distance (e.g., tolerant genotype 3 and sensitive genotype 5) for hybridization, facilitating the genetic analysis of drought tolerance mechanisms and supporting trait improvement efforts.

Cite this article: Oraki, A., Shahbazi, E., Saeidi, K., & Rafiei, F. (2026). Screening of *Nigella sativa* genotypes for drought stress tolerance at germination stage using multivariate analysis. *Iranian Journal of Seed Research*, *12*(2), 201-221. https://doi.org/10.66224/yujs.12.2.201

© The Author(s).

Publisher: Yasouj University.

DOI: 10.66224/yujs.12.2.201

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

Highlights:

- Rapid, cost-effective PEG screening replaces field selection
- Root length as a reliable indicator of seed vigor
- Identifying 4 superior *Nigella* genotypes for drought tolerance

Introduction

Drought stress is one of the most critical abiotic stresses limiting plant growth, development, and agricultural productivity worldwide. In recent years, climate change has intensified drought conditions, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran, thereby threatening food security and crop production (Kapoor et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2024). Seed germination is the stage most sensitive to water deficit, and drought stress during this phase can severely reduce germination percentage, rate, seedling growth, and ultimately crop establishment (El-Badri et al., 2021; Yu et al., 2018). Therefore, identifying drought-tolerant genotypes at the early growth stage is a critical and efficient strategy (Xie et al., 2013). However, comprehensive screening of various black cumin genotypes for drought tolerance during germination using multivariate statistical methods (PCA, cluster analysis, and multivariate tests) has not been fully addressed. This knowledge gap highlights the need for efficient laboratory-based screening methods as cost-effective alternatives to time-consuming field trials. The objective of this study was to evaluate the effects of different PEG-induced drought stress levels on germination components, seedling growth, and seed vigor of 24 black cumin genotypes to identify drought-tolerant and sensitive genotypes. The target audience for this research includes plant breeders, agronomists, and researchers working on medicinal plants under abiotic stress conditions.

Method

This study was conducted in March 2022 at the Crop Physiology Laboratory of Shahrekord University. A factorial experiment based on a completely randomized design (CRD) with three replications was used. The experimental factors included 24 black cumin genotypes (*Nigella sativa* L.) and five drought stress levels: 0 (control), -0.2, -0.3, -0.4, and -0.6 MPa, induced by PEG 6000 (Michel & Kaufmann, 1973). Seeds were sterilized with 3% sodium hypochlorite for 30 seconds and rinsed with distilled water (Khorramdel et al., 2012). Twenty-five seeds were placed in each 9-cm Petri dish on sterilized Whatman filter paper, and 10 mL of PEG solution was added. The dishes were sealed with Parafilm and transferred to a germinator at 20 ± 2°C for 14 days (Kayacetin, 2022). Germination percentage (GP), germination rate (GR), mean germination time (MGT), and seed vigor index (VI) were calculated. Root length, shoot length, seedling fresh weight, and seedling dry weight (dried at 70°C for 24 h) were measured from 10 randomly selected seedlings per dish. Analysis of variance (ANOVA) was performed using SAS 9.2. Correlation analysis, principal component

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

analysis (PCA), and cluster analysis (Ward's method) were conducted using R 4.4.2 based on mean values obtained under severe stress (-0.4 and -0.6 MPa).

Results

Analysis of variance showed that genotype, drought stress, and their interaction had significant effects ($P < 0.001$) on all germination-related traits, indicating substantial genetic variation among the 24 black cumin genotypes and their differential responses to stress levels. Drought stress significantly reduced germination percentage, germination rate, radicle length, shoot length, seedling length, seedling fresh weight, seedling dry weight, and seed vigor, while mean germination time increased progressively with increasing stress intensity. The highest germination percentage was observed in genotype 11 (81.46%) and the lowest in genotype 2 (61.87%). Genotype 8 exhibited the fastest germination rate (18.35 seed/day), whereas genotype 2 showed the slowest (8.94 seed/day). For shoot length, genotype 3 was superior (19.82 mm), while genotypes 17 (28.49 mm) and 24 (27.93 mm) produced the greatest radicle length. The highest seed vigor was recorded in genotype 3 (42.02).

Correlation analysis revealed that the strongest positive and significant correlations were found between seed vigor and seedling length, seed vigor and radicle length, and between seedling length and radicle length. Germination percentage and rate were positively correlated with each other but negatively correlated with mean germination time. Principal component analysis indicated that the first three components, with eigenvalues exceeding one, collectively explained 87.91% of the total variation. The first component (45.30%) was primarily associated with seedling growth and vigor, the second component (26.97%) with germination speed and percentage, and the third component (15.65%) with seedling biomass.

Based on the biplot of the first two principal components, genotypes 3, 8, 11, and 24 were identified as drought-tolerant. Genotypes 1, 2, 12, 14, and 17 performed well for seedling length traits but were weak in germination percentage and rate, while genotype 15 performed well only for germination speed and percentage. Conversely, genotypes 5, 7, 10, and 13 were classified as drought-sensitive. Cluster analysis using Ward's method categorized the 24 genotypes into three distinct groups. Group I (tolerant) comprised genotypes 3, 8, 11, and 24. Group II (semi-tolerant) included genotypes 1, 2, 9, 12, 14, and 17. Group III (sensitive) consisted of the remaining 14 genotypes. Significant differences among groups were confirmed for all traits except seedling dry weight. Multivariate tests (Pillai's trace, Wilks' lambda, Hotelling-Lawley trace, and Roy's largest root) revealed highly significant differences among groups ($P < 0.01$), thereby validating the robustness of the classification. No association was found between geographical origin and genetic diversity. The cluster analysis results were largely consistent with the PCA findings, confirming the reliability of the genotype groupings.

Conclusions

Drought stress is a major environmental constraint limiting crop production, especially in arid regions such as Iran. Our findings demonstrated that drought stress significantly reduced

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

germination percentage, germination rate, seedling growth, and seed vigor while increasing mean germination time. From a practical perspective, the tolerant genotypes identified—specifically genotypes 3, 8, 11, and 24—are promising candidates for breeding programs aimed at developing drought-tolerant black cumin varieties. The strong correlations observed between seed vigor and seedling length, as well as between seed vigor and radicle length, suggest that these traits can serve as reliable and rapid selection criteria for screening large germplasm collections. Multivariate analyses (PCA and cluster analysis) effectively classified genotypes into distinct tolerance groups, with high consistency between the methods, confirming the robustness of the classification. The lack of association between geographical origin and genetic diversity indicates that direct screening is necessary regardless of origin, highlighting the importance of empirical evaluation rather than relying on geographic provenance. Overall, this study provides valuable genetic resources and practical tools for breeding programs aiming to improve drought tolerance in black cumin under water-limited environments.

Author Contributions

Conceptualization and study design, E.S., A.O., and K.S.; methodology, experimentation, data collection, data curation, formal analysis, and original draft preparation, A.O.; supervision and validation, E.S., K.S., and F.R.; writing—review and editing, E.S. and K.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Crop Physiology Laboratory at Shahrekord University for providing the necessary facilities and technical support for conducting this experiment. We also thank our colleagues who assisted with data collection and laboratory measurements.

Ethical Considerations

The authors declare that this manuscript is their original work and has not been published or submitted elsewhere. The authors also confirm that data fabrication, falsification, and plagiarism have been strictly avoided, and that no misconduct has occurred during the course of this study.

Funding

This study was financially supported by Shahrekord University, Iran.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

پژوهش‌های بذر ایران

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

غربالگری ژنوتیپ‌های سیاه‌دانه (*Nigella sativa*) از نظر تحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی با استفاده از تجزیه چندمتغیره

اکرم اورکی[۱]، احسان شهبازی[۲] ✉، کرامت اله سعیدی[۳] و فریبا رفیعی[۴]

۱. دانشجوی دکتری گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: oraki_a@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: eh_shahbazi@sku.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: saeedi@sku.ac.ir

۴. دانشیار گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: Fariba.rafiei@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:
تجزیه به مولفه‌های اصلی
تجزیه خوشه‌ای
تنش خشکی
جوانه‌زنی
سیاهدانه

چکیده

هدف: این مطالعه با هدف ارزیابی اثرات سطوح مختلف تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن‌گلیکول بر صفات جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و بنیه بذر در ۲۴ ژنوتیپ سیاه‌دانه به منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به خشکی انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشگاه شهرکرد اجرا گردید. عوامل آزمایشی شامل ۲۴ ژنوتیپ سیاه‌دانه و پنج سطح تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن‌گلیکول با پتانسیل‌های اسمزی صفر (آب مقطر، شاهد)، ۰/۲-، ۰/۳-، ۰/۴- و ۰/۶- مگاپاسکال بودند. صفات اندازه‌گیری‌شده شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، متوسط زمان جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن تر گیاهچه، وزن خشک گیاهچه و بنیه بذر بودند.

یافته‌ها: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ژنوتیپ، تنش و برهم‌کنش آنها بر تمام صفات مرتبط با جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه معنی‌دار بود. قوی‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار بین بنیه بذر با طول گیاهچه، طول گیاهچه با طول ریشه‌چه، و همچنین بین بنیه بذر با طول ریشه‌چه مشاهده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر نه صفت مرتبط با جوانه‌زنی نشان داد که سه مؤلفه اول با مقادیر ویژه بیشتر از یک، در مجموع ۸۷/۹۱ درصد از واریانس کل را تبیین کردند. بر اساس نمودار بای‌پلات مؤلفه‌های اول و دوم و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش وارد، ژنوتیپ‌ها در سه گروه طبقه‌بندی شدند: متحمل (ژنوتیپ‌های ۳، ۸، ۱۱ و ۲۴)، نیمه‌متحمل (ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۹، ۱۲، ۱۴ و ۱۷) و حساس (۱۴ ژنوتیپ باقی‌مانده). آزمون‌های چندمتغیره (آثار پیلای، لامبدای ویلکز، اثر هاتلینگ-لاولی و بزرگ‌ترین ریشه روی) وجود تفاوت‌های بسیار معنی‌دار (در سطح احتمال ۱ درصد) را بین سه گروه تأیید کردند که صحت طبقه‌بندی را مورد تأیید قرار داد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل‌توجهی در بین ژنوتیپ‌های سیاه‌دانه از نظر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تحت شرایط تنش خشکی است. ژنوتیپ‌های ۳، ۸، ۱۱ و ۲۴ که عملکرد برتری در صفات جوانه‌زنی نشان دادند، برای استفاده در برنامه‌های اصلاحی آینده توصیه می‌شوند. همچنین، گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس پاسخ به تنش، امکان انتخاب والدین با فاصله ژنتیکی بیشتر (به عنوان مثال، ژنوتیپ متحمل ۳ و ژنوتیپ حساس ۵) را برای دورگ‌گیری فراهم می‌آورد که می‌تواند به تحلیل ژنتیکی سازوکارهای تحمل به خشکی کمک کرده و از تلاش‌های بهبود صفات پشتیبانی نماید.

جنبه‌های نوآوری:

- غربالگری سریع و کم‌هزینه با پلی‌اتیلن‌گلیکول به جای انتخاب مزرعه‌ای
- معرفی طول ریشه‌چه به عنوان شاخص معتبر بنیه بذر
- شناسایی ۴ ژنوتیپ برتر سیاه‌دانه برای تحمل به خشکی

استناد: اورکی، اکرم؛ شهبازی، احسان؛ سعیدی، کرامت اله؛ و رفیعی، فریبا (۱۴۰۴). غربالگری ژنوتیپ‌های سیاه‌دانه (*Nigella sativa*) از نظر تحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی با استفاده از تجزیه چندمتغیره. *پژوهش‌های بذر ایران*، ۱۲(۲)، ۲۲۱-۲۰۱.

https://doi.org/10.66224/yujs.12.2.201

ناشر: دانشگاه یاسوج.

© نویسندگان

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

مقدمه

گیاهان دارویی، به‌ویژه گیاهانی که فعالیت‌های زیستی متنوعی دارند، توجه زیادی را در جوامع علمی و پزشکی به‌خود جلب کرده‌اند، در میان این گیاهان، سیاهدانه با نام علمی (*Nigella sativa* L.)، که معمولاً با نام زیره سیاه شناخته می‌شود به دلیل کاربرد گسترده آن در زمینه‌های درمانی و آشپزی، مورد توجه قرار گرفته شده است (حسنین[1] و همکاران، ۲۰۱۴؛ کرالان[2] و همکاران، ۲۰۱۷). دانه‌های این گیاه دارای طیف وسیعی از اثرات دارویی، از جمله پاداکسایندگی، ضد درد، ضد التهاب، تعدیل‌کننده سیستم ایمنی، ضد سرطان، محافظت‌کننده عصبی، ضد میکروبی (ضد باکتری، ضد قارچ، ضد ویروس و ضد انگل)، ضد فشار خون، محافظت‌کننده قلبی، ضد دیابت، ضد اسپاسم ، ضد فشار خون نیز می‌باشند (یمر[3] و همکاران، ۲۰۱۹).

خشکی به‌عنوان یکی از موثرترین تنش‌های غیرزیستی، با تاثیر منفی بر رشد گیاه و فیزیولوژی آن، عامل اصلی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است که در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری تشدید یافته است. (کاپور[4] و همکاران،۲۰۲۰). طبق گزارش سازمان ملل متحد (ویسنته-سرانو[5] و همکاران، ۲۰۲۴)، بیش از سه چهارم خشکی‌های زمین در طول ۳۰ سال گذشته خشک‌تر شده‌اند و مناطق خشک تقریباً ۴/۳ میلیون کیلومتر مربع گسترش یافته‌اند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۴۰، گسترش خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی، که به افزایش ۳/۹ درصدی مناطق خشک منجر می‌شود، می‌تواند باعث از بین رفتن محصولات مهم کشاورزی شود. با توجه به دوره‌های طولانی بارندگی کمتر از حد طبیعی و افزایش دما، خشکی یک مسئله جهانی مهم برای تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود. بسته به گونه محصول و مرحله رشد، تنش خشکی متابولیسم و فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش رشد و عملکرد می‌شود که می‌تواند از ۳۰ تا ۹۰ درصد متغیر باشد (خان[6] و همکاران، ۲۰۲۵).

گیاهان در طول مراحل مختلف رشد به‌طور مداوم با عوامل تنش‌زای محیطی زیادی در محیط طبیعی خود مواجه می‌شوند. جوانه‌زنی بذر، به‌عنوان یک ویژگی فیزیولوژیکی قابل توجه، بر سازگاری و بقای گیاه تأثیر می‌گذارد (یان و چن[7]، ۲۰۲۰). در برخی از گیاهان جوانه‌زنی بذر حساس‌ترین مرحله به کمبود آب است (البدری[8] و همکاران، ۲۰۲۱).

تنش خشکی در طول جوانه‌زنی می‌تواند تاثیر شدیدی برای موفقیت چرخه زندگی گیاه داشته باشد، زیرا نبود آب کافی در این مرحله می‌تواند مانع رشد قوی ریشه‌ها و شاخساره‌ها شود و منجر به تلفات قابل توجه محصول شود (گیتز[9] و همکاران، ۲۰۱۶؛ یو[10] و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی در مراحل اولیه رشد حیاتی و کارآمد به نظر می‌رسد (زی[11] و همکاران، ۲۰۱۳).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موفقیت تولید محصول تا حد زیادی به جوانه‌زنی بهینه بذر و رشد اولیه گیاهچه بستگی دارد. این رشد اولیه بطور مستقیم با ظرفیت بذرها برای جوانه‌زدن، حتی در شرایط تنش خشکی مرتبط است (خان و همکاران، ۲۰۱۹). جوانه‌زنی بذر یک مرحله غربالگری برای شناسایی تحمل گونه‌های مختلف گیاهی در برابر خشکی است. جذب آب به‌وسیله بذر، نیاز اساسی برای شروع جوانه‌زنی بذر است. برای درک ویژگی‌های جوانه‌زنی و پارامترهای مبتنی بر بذر ارزیابی‌ها در محیط کنترل شده، قبل از ارزیابی در مزرعه انجام می‌گردد (ویجواردانا[12] و همکاران، ۲۰۱۸). قرار دادن بذور در شرایط آزمایشگاهی با پتانسیل اسمزی شبیه‌سازی شده به‌وسیله پلی‌اتیلن‌گلیکول یک معیار مناسب برای غربالگری گونه‌های گیاهی برای تحمل به

[1] Hassanien
[2] Kiralan
[3] Yimer
[4] Kapoor
[5] Vicente-Serrano

[6] Khan
[7] Yan & Chen
[8] El-Badri
[9] Gitz
[10] Yu
[11] Xie
[12] Wijewardana

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

خشکی با دقت خوب است (ماسکولو[1] و همکاران، ۲۰۱۴).

تنش خشکی اغلب جوانه‌زنی بذر را به تأخیر می‌اندازد یا کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به رشد نامنظم و ضعیف محصول می‌شود (کایاستین[2]، ۲۰۲۲). بلوچی[3] و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که در سیاهدانه و ماریتیغال با کاهش پتانسیل اسمزی (افزایش شدت خشکی)، درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت؛ در این آزمایش مقایسه سطوح مختلف تنش نشان داد که نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه در هر دو گیاه، با افزایش میزان تنش اسمزی، رابطه مستقیم دارد که دلیل آن را می‌توان به تاثیر بیش‌تر تنش خشکی بر طول ساقه‌چه در مقایسه با طول ریشه‌چه دانست. خرم دل[4] و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای روی گیاه سیاهدانه، نشان دادند که با کاهش پتانسیل آب پارامترهای جوانه‌زنی از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و هم‌چنین وزن خشک آن‌ها مشاهده شد.

از آنجائی‌که ایران جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود و وقوع خشکسالی در ایران در چند دهه اخیر افزایش یافته است، تنش‌های محیطی و به‌ویژه تنش‌های خشکی و راهکارهای مقابله با آن‌ها نیاز به توجه و اهمیت بیش‌تری دارد (پیوس[5] و همکاران، ۲۰۲۰).

انتخاب و کشت محصولات متحمل به تنش خشکی که بتوانند در شرایط آب و هوایی نامناسب زنده بمانند و حفظ شوند، بسیار مهم است. از آنجا که بخش عمده‌ای از تحقیقات پیشین بر بررسی پاسخ ژنوتیپ‌ها در مناطق جغرافیایی محدود متمرکز بوده است، این مطالعه با بهره‌گیری از ژنوتیپ‌هایی با تنوع جغرافیایی گسترده‌تر، به ارزیابی آن‌ها تحت سطوح مختلف تنش خشکی پرداخت. همچنین، در این پژوهش با استفاده از تجزیه‌های چندمتغیره، گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها در مرحله جوانه‌زنی صورت گرفت. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در غربالگری اولیه و گزینش ژنوتیپ‌های برتر و متحمل به خشکی، جهت برنامه‌های به‌نژادی و توسعه کشت سیاهدانه در مناطق دارای محدودیت آبی، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین اثر تنش خشکی روی صفات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌ای سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)، این تحقیق در اسفند ماه سال ۱۴۰۰ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشگاه شهرکرد اجرا شد. آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد، که فاکتور اول شامل ۲۴ ژنوتیپ سیاه‌دانه (شامل ژنوتیپ‌های داخلی و خارجی) بود. ژنوتیپ‌ها از بانک ژن موسسه IPK آلمان (Gene Bank Gatersleben - Leibniz-Institut)، شرکت پاکان بذر اصفهان و مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شدند (جدول ۱). فاکتور دوم شامل ۵ سطح تنش خشکی، سطح صفر (آب مقطر)، ۰/۲-، ۰/۳-، ۰/۴- و ۰/۶- مگاپاسکال بود، برای تهیه این پتانسیل اسمزی از پلی-اتیلن ۶۰۰۰ با روش میشل و کافمن[6] (۱۹۷۳) استفاده شد. ابتدا بذور با محلول هیپوکلریت ۳ درصد به مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی شدند و بعد از آن چندین بار با آب مقطر شستشو شدند (خرم دل و همکاران، ۲۰۱۲). در هر واحد آزمایش که شامل پتری ۹ سانتی‌متری بود، ۲۵ بذر یکنواخت سیاهدانه انتخاب و روی یک لایه کاغذ صافی واتمن که قبل از انجام آزمایش ضدعفونی شده بودند، قرار گرفتند، به هر پتری، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول پلی‌اتیلن‌گلیکول با پتانسیل مورد نظر اضافه شد. در پایان کار درب پتری‌ها با پارافیلم بسته و برچسب زده شد. پس از آن، پتری‌ها به داخل دستگاه ژرمیناتور، با درجه حرارت ۲ ± ۲۰ درجه سلسیوس و تناوب نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، به مدت ۱۴ روز منتقل شدند (کایاستین، ۲۰۲۲). تعداد بذرهای جوانه‌زده (با طول ریشه‌چه حداقل دو میلی‌متر) بصورت روزانه و در ساعت معین شمارش و ثبت شد. در روز چهاردهم پس از آزمایش از هر ظرف پتری، ۱۰ گیاهچه به‌طور تصادفی انتخاب و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه آن‌ها با کمک خط‌کش با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. به منظور تعیین میانگین وزن تر و خشک گیاهچه، نمونه‌برداری از ۱۰

[1] Muscolo
[2] Kayacetin
[3] Balouchi
[4] Khorramdel
[5] Payus
[6] Michel & Kaufmann

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

جدول ۱. اسامی و منشاء ژنوتیپ‌های سیاه‌دانه مورد مطالعه

Table 1. Names and origins of the studied *Nigella Sativa* L. genotypes

کد ژنوتیپ Genotypic code	نام ژنوتیپ Genotype name	منشا Origin	کد ژنوتیپ Genotypic code	نام ژنوتیپ Genotype name	منشا Origin
G1	Freidun 1	Iran	G13	Nige55	Lebanon
G2	Chaharmahal	Iran	G14	Nige61	Tunisia
G3	Semirom	Iran	G15	Nige64	Algeria
G4	Mashhad	Iran	G16	Nige68	Uzbekistan
G5	Qazvin	Iran	G17	Nige72	Syria
G6	Kerman	Iran	G18	Nige73	Uzbekistan
G7	Dehaqan	Iran	G19	Nige75	Georgia
G8	Freidun 2	Iran	G20	Nige76	Kyrgyzstan
G9	Isfahan	Iran	G21	Nige78	Yemen
G10	Nige45	Ethiopia	G22	Nige81	Unknown
G11	Nige53	Tajikistan	G23	23750	Iran
G12	Nige59	Syria	G24	23768	Iran

گیاهچه بصورت تصادفی از هر پتری انجام شد. برای محاسبه وزن خشک، نمونه‌های تر گیاهچه در کاغذ آلومینیومی بسته‌بندی شد و به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند، پس از آن با ترازوی دیجیتال ساخت شرکت AND (ژاپن) با حداکثر ظرفیت ۲۲۰ گرم و دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن شدند (عساکره و خدارحم‌پور[1]، ۲۰۱۶). صفات مورد اندازه گیری در این تحقیق شامل درصد جوانه‌زنی (GP)، سرعت جوانه‌زنی (GR)، متوسط زمان جوانه‌زنی (MGT)، طول ریشه‌چه (RL)، طول ساقه‌چه (ShL)، طول گیاهچه (SL)، وزن تر گیاهچه (SFW)، وزن خشک گیاهچه (SDW) و شاخص بنیه بذر (VI) بود.

درصد و سرعت جوانه‌زنی با استفاده از روش پیشنهادی کاتیولی[2] و همکاران (۲۰۰۸) محاسبه گردید.

درصد جوانه‌زنی[3] GP

رابطه ۱)
$$GP = [\frac{n}{N}] \times 100$$

GP: درصد جوانه‌زنی، n: درصد نهایی بذرهای جوانه زده و N: تعداد بذرهای کشت شده.

سرعت جوانه‌زنی[4] GR

رابطه ۲)
$$GR=\sum \frac{\text{تعداد کل بذرهای جوانه زده تا روز } i\text{ام}}{\text{تعداد روز از شروع آزمایش}}$$

متوسط زمان جوانه‌زنی طبق معادله الیس و روبرت[5] (۱۹۸۱) (رابطه ۳) محاسبه شد:

رابطه ۳)
$$MGT = \frac{\sum nt}{\sum n}$$

MGT: متوسط زمان جوانه‌زنی، n: تعداد بذر جدید که در زمان t جوانه‌زده، t: روزها بعد از کاشت.

شاخص بنیه بذر با استفاده از فرمول زیر (رابطه ۴) (عبدول- باکی و اندرسون[6]، ۱۹۷۳) محاسبه شد:

رابطه ۴)
$$VI= \frac{\%\ GP \times MSH}{100}$$

VI: شاخص بنیه بذر، GP%: درصد جوانه‌زنی، MSH: میانگین طولی گیاهچه (ریشه‌چه و گیاهه‌چه).

[1] Asakreh & Khodarahmpour
[2] Cattivelli
[3] Germination percentage
[4] Germination rate
[5] Ellis & Robert
[6] Abdul-baki and Anderson

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

تجزیه آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ انجام گرفت. برای بهتر مشخص شدن ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی میانگین ژنوتیپ‌ها در تنش‌های شدید (سطوح ۰/۴- و ۰/۶- مگاپاسکال) جهت آنالیزهای همبستگی بین صفات، تجزیه به مولفه‌های اصلی و تجزیه خوشه‌ای با استفاده از نرم‌افزار R4.4.2 مورد بررسی و آنالیز قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس که در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر ژنوتیپ، خشکی و برهمکنش آن‌ها، برای تمام صفات مرتبط با جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه معنی‌دار گردید. بنابراین میان ژنوتیپ‌های سیاهدانه مورد بررسی از نظر ژنتیکی برای تمام صفات مورد مطالعه در مرحله جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و از آنجائی‌که برهمکنش نیز معنی‌دار گردید لذا پاسخ این ژنوتیپ‌ها به سطوح مختلف تنش خشکی متفاوت می‌باشد.

درصد جوانه‌زنی: نتایج مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ در تنش خشکی (جدول ۳) نشان داد که با افزایش سطح تنش از شاهد (آب مقطر) به ۰/۶- مگاپاسکال، درصد جوانه‌زنی کلیه‌ی ژنوتیپ‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در تیمار شاهد و مربوط به ژنوتیپ‌های ۳، ۱۱، ۸، ۱۵و ۱۶ (با ۱۰۰درصد) و کم‌ترین درصد در سطح ۰/۶- مگاپاسکال و مربوط به ژنوتیپ ۷ (با ۲۰ درصد) مشاهده شد. بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی مربوط به ژنوتیپ ۱۱ با ۸۱/۴۷ درصد بود. در مقابل، ژنوتیپ ۲ با ۶۱/۸۷ درصد کم‌ترین درصد جوانه‌زنی را داشت.کاهش جوانه‌زنی، به جذب محدود آب، کاهش تامین انرژی و تغییر فعالیت‌های آنزیمی نسبت داده شده است؛ در واقع تنش خشکی گرادیان پتانسیل آب بین محیط داخلی و خارجی بذر را کاهش می‌دهد. بنابراین، کاهش نفوذپذیری آب از طریق پوسته بذر و جذب آب اولیه کمتر در شرایط تنش می‌تواند موجب کاهش جوانه‌زنی بذر گردد (بهرامی[1] و همکاران، ۲۰۱۲).

متوسط زمان جوانه‌زنی: بررسی اثر همکنش ژنوتیپ در تنش خشکی نشان داد که این صفت به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر تنش خشکی قرار گرفته است و با افزایش سطح تنش این زمان افزایش یافته است (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به ژنوتیپ ۲ با ۱۰/۸۷ روز و کم‌ترین مقدار آن متعلق به ژنوتیپ ۸ با ۱۰/۱۷ روز بود (جدول ۳). در شدیدترین سطح تنش (۰/۶- مگاپاسکال) ژنوتیپ‌های ۸، ۱۱ و ۳ طولانی‌ترین و ژنوتیپ‌های ۲، ۵، ۱۳، ۱۴ و ۲۳ کوتاه‌ترین زمان جوانه‌زنی را داشتند. سازوکارهای مساعد برای ظهور ریشه‌چه از پوسته بذر، می‌تواند به دلیل کمبود هیدراسیون بذر در نتیجه پتانسیل اسمزی بالا، مهار گردند که در نتیجه منجر به تاخیر در جوانه‌زنی بذر شوند (گیل[2] و همکاران، ۲۰۰۳). در گیاهان دارویی رازیانه[3] و زنیان[4] با افزایش تنش خشکی، متوسط زمان جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (فاخری[5] و همکاران، ۲۰۱۷).

سرعت جوانه‌زنی: نتایج مقایسه برهمکنش ژنوتیپ در تنش خشکی (جدول ۳) نشان داد با افزایش سطوح تنش، تمام ژنوتیپ‌ها روند کاهشی را در سرعت جوانه‌زنی از خود نشان دادند. بیش‌ترین مقدار سرعت جوانه‌زنی مربوط به ژنوتیپ ۸ (۱۸/۳۵ بذر در روز) و کم‌ترین آن مربوط به ژنوتیپ ۲ (۸/۹۴ بذر در روز) بود. صفت تحت تاثیر تنش خشکی در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). در سطح شاهد ژنوتیپ‌های ۲ و ۷ بیش‌ترین و در سطح تنش ۰/۶- مگاپاسکال، ژنوتیپ‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ کم‌ترین سرعت جوانه‌زنی را نشان دادند. استقرار موفقیت‌آمیز گیاهچه‌ها نیازمند سبز-شدن سریع و یکنواخت است، به‌ویژه هنگامی که شرایط محیطی محدودکننده باشد (رید[6] و همکاران، ۲۰۰۲). سرعت سبز شدن معیار مهمی در اصلاح گیاهان برای یافتن ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا به‌ویژه در شرایط تنش خشکی است، زیرا نهال‌هایی که سرعت سبز شدن بالایی دارند، در رقابت برای فضا، نور و منابع آب برتری داشته و در نهایت بالاترین عملکرد را در مقایسه با سایرین خواهند

[1] Bahrami

[2] Gill
[3] *Foeniculum vulgare* L.
[4] *Trachyspermum copticum*
[5] Fakheri
[6] Reed

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

جدول ۲. میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس صفات مرتبط با جوانه‌زنی در ۲۴ ژنوتیپ سیاه‌دانه در شرایط تنش خشکی

Table 2. Mean squares derived from the analysis of variance for germination traits in 24 *Nigella sativa* genotypes under drought stress

S.O.V	منبع تغییرات	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ساقه‌چه Shoot length
Genotype	ژنوتیپ	23	382.59**	0.54**	77.60**	110.83**
Drought stress	تنش خشکی	4	56243.01**	11.28**	77.60**	4671.91**
Genotype × Drought stress	ژنوتیپ × تنش خشکی	92	99.85**	0.078**	8.22**	33.83**
Error	خطا	240	1680	6.25	87.37	125.31
Coefficient of variation (%)	درصد ضریب تغییرات		3.71	1.55	4.25	5.02

S.O.V	منبع تغییرات	درجه آزادی df	طول ریشه‌چه Radicle length	طول گیاهچه Seedling length	وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	بنیه بذر Seed vigor
Genotype	ژنوتیپ	23	252.3**	630.27**	0.00016**	0.000047**	470.28**
Drought stress	تنش خشکی	4	14341.92**	35285.47**	0.0063**	0.0007**	49457.01**
Genotype × Drought stress	ژنوتیپ × تنش خشکی	92	64.12**	125.11**	0.000034**	0.00003**	131.47**
Error	خطا	240	261.47	286.66	0.00006	0.000035	410.31
Coefficient of variation (%)	درصد ضریب تغییرات		4.75	2.99	5.09	12.1	4.23

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

**: significant at 1% probability level

خواهند داشت (خدارحم‌پور[1]، ۲۰۱۱). نتایج مشابهی در رابطه با سرعت جوانه‌زنی توسط خرم دل و همکاران (۲۰۱۲) در مورد گیاه سیاهدانه گزارش شده است.

طول ریشه‌چه و ساقه‌چه: نتایج مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ در تنش نشان داد که با افزایش سطح تنش طول ریشه‌چه در تمام ژنوتیپ‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). در بین ژنوتیپ‌های مختلف، میانگین بیش‌ترین طول ریشه‌چه در ژنوتیپ ۲۴ با طول ۲۷/۹۳ میلی‌متر و کم‌ترین میانگین این صفت، در ژنوتیپ ۱۰ با طول ۱۵/۱۴ میلی‌متر مشاهده شد (جدول ۳). با افزایش سطح تنش، طول ساقه‌چه در تمام ژنوتیپ‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین میانگین طول ساقه‌چه مربوط به ژنوتیپ‌های ۳ (۱۹/۸۲ میلی‌متر) و ۱۲ (۱۹/۷۳ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به ژنوتیپ ۲۲ (۱۰/۵۲ میلی‌متر) بود (جدول۳).

در شرایط تنش خشکی به علت کم آب بودن پروتوپلاسم و متعاقبا تاثیر آن بر کاهش تقسیم سلولی، رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه کاهش می‌یابد (لیپیک[2] و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج این آزمایش در رابطه با صفت طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه تحت تاثیر تنش خشکی، با گزارش وفایی[3] و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد.

[1] Khodarahmpour

[2] Lipiec

[3] Vafaee

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

جدول ۳. مقایسه میانگین صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذر بین ژنوتیپ‌های مختلف سیاه‌دانه در شرایط مختلف تنش خشکی.

Table 3. Mean comparison of seed germination traits among black cumin genotypes under drought stress.

ژنوتیپ Genotype	درصد جوانه‌زنی Germination percentage						متوسط زمان جوانه‌زنی (روز) Mean germination time (day)						سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Germination rate (seed/day)					
	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean
1	98.7	97.3	72.0	50.7	37.3	71.20^{ef}	26.5	20.5	12.4	7.7	4.5	10.51^{e-h}	9.7	10.2	10.6	10.8	11.3	14.33^{fg}
2	98.7	81.3	64.0	40.0	25.3	61.87^{m}	16.3	11.7	8.8	5.0	2.8	10.87^{a}	10.7	10.7	10.9	10.9	11.2	8.94^{k}
3	100.0	98.7	85.3	69.3	44.0	79.47^{b}	28.8	22.8	15.7	10.8	6.2	10.37^{ijk}	9.7	10.1	10.4	10.7	11.0	16.86^{b}
4	96.7	89.3	61.3	45.3	34.7	65.47^{hm}	19.0	13.3	10.1	7.3	4.7	10.81^{ab}	10.4	10.8	10.7	10.8	11.3	10.87^{j}
5	98.0	96.7	82.7	38.7	22.7	67.73^{ij}	24.1	20.1	13.7	6.1	3.0	10.47^{f-i}	10.0	10.1	10.7	10.6	11.0	13.41^{h}
6	96.0	92.0	70.7	42.7	29.3	66.13^{jkl}	17.9	14.6	11.7	7.1	4.1	10.66^{cd}	10.4	10.5	10.7	10.7	11.0	11.07^{j}
7	96.0	89.3	77.3	57.3	20.0	68.00^{hij}	19.2	17.5	12.3	8.0	2.7	10.73^{bc}	10.6	10.2	10.8	11.1	10.9	11.94^{i}
8	98.7	96.7	89.3	64.0	49.3	79.60^{ab}	28.1	23.7	20.7	10.8	8.4	10.17^{n}	9.6	9.9	10.0	10.4	10.8	18.35^{a}
9	98.7	93.3	77.3	53.3	26.7	69.87^{fgh}	23.2	21.0	16.5	9.8	4.4	10.36^{ijk}	10.0	10.1	10.2	10.7	10.8	14.96^{de}
10	98.7	96.7	65.3	42.7	34.7	67.60^{ijk}	20.9	16.1	12.2	6.7	4.7	10.53^{efg}	10.1	10.5	10.3	10.6	11.1	12.13^{i}
11	100.0	96.7	93.3	66.7	50.7	81.47^{a}	28.4	23.4	19.0	11.2	7.9	10.34^{kl}	10.1	10.0	10.2	10.5	10.8	17.98^{a}
12	98.0	97.3	65.3	41.3	26.7	65.73^{klm}	28.2	21.9	14.7	7.4	4.2	10.24^{lmn}	9.6	10.0	10.0	10.6	11.1	15.28^{d}
13	97.3	96.0	81.3	44.0	25.3	68.80^{ghi}	25.2	21.8	14.1	6.0	3.8	10.32^{klm}	9.7	10.0	10.2	10.8	11.0	14.19^{fg}
14	98.0	89.3	73.3	37.3	22.7	64.13^{m}	22.3	17.4	11.7	6.1	3.3	10.55^{def}	10.0	10.3	10.8	10.6	11.1	12.16^{i}
15	100.0	96.0	78.7	61.3	45.3	76.27^{c}	19.7	18.6	12.7	9.5	6.5	10.62^{cde}	10.1	10.3	10.8	10.8	11.1	13.42^{h}
16	100.0	95.3	77.3	65.3	37.3	75.07^{c}	21.7	20.1	15.3	9.7	5.0	10.43^{g-k}	10.1	10.2	10.2	10.7	11.0	14.37^{fg}
17	97.3	96.7	74.7	50.7	37.3	71.33^{ef}	22.7	22.0	14.0	7.5	5.5	10.43^{kl}	9.8	10.1	10.4	10.8	11.0	14.34^{fg}
18	96.7	96.7	86.7	57.3	37.3	74.93^{c}	25.8	23.1	15.0	10.8	5.4	10.32^{f-j}	9.6	9.9	10.5	10.6	10.9	16.01^{c}
19	98.0	95.3	73.3	57.3	28.0	70.40^{fg}	21.1	18.7	13.9	8.9	4.7	10.44^{fg}	10.1	10.3	10.3	10.8	10.7	13.48^{h}
20	98.0	96.0	77.3	61.3	30.7	72.67^{de}	27.0	21.6	16.3	10.7	5.5	10.20^{mn}	9.7	10.0	10.1	10.5	10.7	16.22^{c}
21	98.7	95.3	82.7	65.3	30.7	74.53^{cd}	25.7	21.9	17.0	10.1	4.9	10.33^{kl}	9.8	10.2	10.3	10.7	10.7	15.93^{c}
22	98.7	97.3	77.3	57.3	26.7	71.47^{ef}	22.9	19.1	14.3	9.4	4.2	10.40^{hk}	10.0	10.2	10.3	10.6	11.0	13.97^{g}
23	98.7	95.3	81.3	66.7	22.7	72.93^{de}	24.2	22.7	12.9	9.8	3.5	10.25^{kn}	9.6	9.9	10.1	10.7	10.9	14.62^{ef}
24	98.0	95.3	82.7	58.7	29.3	72.80^{de}	26.6	23.0	13.8	12.5	5.2	10.23^{kn}	9.7	10.0	10.4	10.2	10.9	16.23^{c}
Mean	98.22	94.5	77.1	53.9	32.2	-	23.5	19.8	14.1	8.7	4.8	-	9.9	12.1	10.4	10.6	10.9	-
LSD α=0.05			4.25			-			0.26			-			0.97			-

ژنوتیپ Genotype	طول ساقه‌چه (میلی‌متر) Shoot length (mm)						طول ریشه‌چه (میلی‌متر) Radicle length (mm)						طول گیاهچه (میلی‌متر) Seedling length (mm)					
	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean
1	20.8	18.1	14.0	10.9	5.8	13.94^{f}	39.6	29.4	19.9	14.2	10.3	22.69^{d}	60.4	47.9	33.6	25.1	15.8	36.57^{i}
2	23.4	25.1	18.7	13.1	8.9	17.83^{b}	38.7	35.4	26.4	14.3	10.9	25.15^{c}	62.0	60.3	45.1	27.1	19.9	42.88^{e}
3	43.8	23.2	14.7	11.1	6.4	19.82^{a}	52.2	33.0	24.4	16.1	10.6	27.26^{b}	96.1	55.5	39.1	26.9	16.7	46.83^{b}
4	32.9	20.5	10.2	7.0	4.1	14.94^{d}	46.8	29.8	13.9	9.1	6.4	21.17^{ef}	80.0	50.2	24.1	16.1	10.5	36.18^{i}
5	34.6	29.8	12.1	7.9	4.4	17.77^{b}	42.3	31.3	18.5	8.6	6.1	21.37^{e}	77.5	61.5	30.6	16.5	10.6	39.35^{g}
6	31.5	19.2	13.9	9.0	4.0	15.51^{c}	41.8	30.1	19.9	14.5	7.6	22.77^{d}	73.8	49.0	33.6	23.5	11.6	38.28^{h}
7	31.0	18.9	13.0	8.0	3.9	14.95^{d}	40.0	25.8	16.5	9.7	7.5	19.89^{gh}	70.9	44.7	29.2	17.7	11.4	34.78^{j}
8	18.6	15.6	11.3	11.3	5.3	12.44^{ijk}	44.9	30.1	24.8	16.0	9.5	25.05^{c}	63.9	46.0	35.8	27.3	14.9	37.58^{h}
9	21.3	16.0	13.3	11.0	3.3	12.99^{gh}	37.2	26.2	20.3	13.9	5.8	20.68^{ef}	57.2	42.2	34.0	25.1	8.8	33.45^{k}
10	20.2	15.5	10.8	6.8	4.7	11.61^{l}	25.7	20.0	13.9	9.5	6.6	15.14^{k}	45.9	35.5	24.7	16.0	11.3	26.68^{o}
11	21.2	16.8	14.1	10.9	7.6	14.13^{ef}	51.3	37.6	24.5	14.2	10.4	27.59^{b}	72.9	54.0	37.9	25.0	18.0	41.56^{f}
12	37.3	24.5	18.0	13.9	4.9	19.73^{a}	43.8	34.7	22.0	17.8	8.0	25.25^{c}	80.7	59.0	40.0	31.7	12.6	44.81^{d}
13	21.9	18.9	14.0	9.0	3.1	13.37^{g}	56.7	22.9	18.6	9.7	6.7	22.93^{d}	73.4	44.8	33.9	18.7	9.8	36.13^{i}
14	25.4	22.0	14.5	13.6	3.8	15.85^{c}	53.2	29.1	20.8	16.0	9.9	25.80^{c}	78.2	51.0	34.6	29.2	13.7	41.35^{f}
15	21.6	14.0	9.9	5.7	3.3	10.89^{mn}	43.0	21.0	15.4	8.9	5.8	18.84^{i}	64.5	35.4	25.3	14.3	9.4	29.79^{n}
16	21.7	15.4	10.7	8.6	4.5	12.18^{kj}	22.7	16.9	14.8	10.8	6.5	14.31^{l}	43.7	32.3	25.1	18.7	11.0	26.14^{o}
17	24.6	21.3	16.1	12.3	4.9	15.82^{c}	53.0	38.7	25.0	15.0	10.7	28.49^{a}	85.9	54.1	45.6	27.0	15.6	45.64^{c}
18	20.5	14.5	16.3	9.4	3.3	12.80^{hi}	51.7	19.6	16.2	9.6	5.9	20.60^{fg}	73.8	34.1	32.5	19.4	8.9	33.73^{k}
19	30.1	16.3	12.9	9.1	4.8	14.64^{de}	47.0	23.0	15.6	13.4	8.0	21.41^{e}	76.7	39.3	28.5	22.6	12.9	35.98^{i}
20	22.9	14.1	12.0	8.9	5.0	12.60^{hij}	34.4	21.9	16.4	11.0	6.6	18.05^{j}	58.0	35.9	28.6	19.9	11.6	30.81^{m}
21	17.8	16.6	11.3	7.9	6.7	12.07^{kl}	35.6	24.2	19.4	13.6	6.4	19.83^{h}	53.1	41.1	36.7	21.5	13.0	33.09^{k}
22	17.0	16.5	8.6	5.6	4.9	10.52^{n}	26.6	18.2	14.6	8.3	4.3	14.41^{kl}	43.6	34.7	23.2	13.9	9.2	24.93^{p}
23	22.2	12.5	10.4	7.5	2.8	11.09^{m}	53.9	26.5	11.7	9.7	3.0	20.99^{cf}	75.8	38.7	22.1	16.7	5.9	31.83^{l}
24	31.2	27.5	13.1	11.0	7.5	18.07^{b}	62.3	29.5	23.3	14.8	9.8	27.93^{a}	91.7	59.2	46.9	26.1	16.9	48.17^{a}
Mean	25.5	18.8	13.1	9.6	4.9	-	43.5	27.2	19.0	12.4	7.6	-	69.1	46.1	32.9	21.9	12.5	-
LSD α=0.05			1.16			-			1.68			-			1.76			-

ژنوتیپ Genotype	وزن تر گیاهچه (میکروگرم) Seedling fresh weight (µg)						وزن خشک گیاهچه (میکروگرم) Seedling dry weight (µg)						بنیه بذر Seed vigor					
	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean	شاهد Control	-0.2 MPa	-0.3 MPa	-0.4 MPa	-0.6 MPa	میانگین Mean
1	29.7	12.1	4.7	2.7	1.6	10.1^{g}	5.9	2.4	0.9	0.5	0.3	2.02^{j}	60.4	47.3	24.2	12.7	5.9	30.11^{hi}
2	14.1	10.8	7.2	2.5	1.3	7.2^{kl}	2.8	2.2	1.4	0.5	0.3	1.45^{lmn}	62.0	49.1	28.9	10.9	5.0	31.18^{g}
3	41.7	22.3	12.3	8.0	2.6	17.4^{a}	8.3	4.5	2.4	1.0	0.5	3.33^{g}	96.1	54.7	33.4	18.6	7.3	42.02^{a}
4	13.2	9.5	7.0	3.7	1.6	7.0^{kl}	2.7	1.9	1.1	0.8	0.3	1.37^{mno}	80.0	44.9	14.8	7.3	3.6	30.12^{hi}
5	23.7	10.7	4.5	1.8	1.1	8.3^{i}	4.6	2.4	0.9	0.4	0.2	1.70^{kl}	77.5	59.8	25.3	6.4	2.4	34.29^{c}
6	14.2	9.9	6.3	1.8	0.7	6.6^{m}	2.8	2.0	1.3	0.4	0.1	1.30^{no}	73.8	45.1	23.7	10.0	3.4	31.20^{g}
7	14.0	7.9	2.8	1.8	0.7	5.4^{n}	2.8	1.6	0.6	0.3	0.1	1.10^{o}	70.9	39.9	22.6	10.2	2.3	29.18^{hi}
8	33.3	18.9	13.1	2.8	0.6	13.7^{d}	6.1	3.8	2.7	0.6	0.1	2.65^{h}	63.9	45.4	32.0	17.5	7.4	33.22^{f}
9	31.0	16.9	11.8	6.6	2.0	13.7^{d}	6.2	3.4	2.4	1.2	0.4	2.72^{h}	57.2	39.4	26.3	13.4	2.4	27.72^{k}
10	24.9	9.6	4.0	1.8	1.2	8.3^{ij}	5.2	1.6	0.8	0.3	0.1	1.59^{klm}	45.9	35.0	16.2	6.8	3.9	21.57^{mn}
11	32.3	16.5	6.8	2.6	1.4	11.9^{f}	6.4	3.2	1.4	0.5	0.1	2.33^{i}	72.9	53.3	35.4	16.7	9.1	37.46^{c}
12	23.1	8.7	5.1	2.8	1.8	8.3^{ij}	4.8	1.7	9.8	0.5	0.4	3.44^{fg}	80.7	57.5	26.2	13.1	3.4	36.16^{d}
13	27.2	13.1	7.7	2.5	0.9	10.3^{g}	14.2	2.5	1.7	0.6	0.2	3.82^{jk}	73.4	43.6	27.6	8.2	2.5	31.07^{f}
14	16.1	11.1	6.4	4.3	1.9	8.0^{j}	3.2	2.3	1.6	1.4	0.7	1.83^{jk}	78.2	45.6	25.4	10.9	3.1	32.64^{f}
15	35.7	19.6	11.2	5.3	2.1	14.8^{c}	16.5	10.9	2.8	1.7	0.7	6.51^{b}	64.5	34.0	19.9	8.8	4.3	26.29^{l}
16	16.7	12.0	7.9	2.5	1.3	8.1^{ij}	3.5	2.0	1.4	1.2	0.3	1.68^{kl}	43.7	31.4	19.4	12.2	4.1	22.16^{m}
17	20.5	14.1	8.3	3.1	1.5	9.5^{h}	12.4	2.7	1.1	0.8	0.2	3.44^{fg}	85.9	53.4	34.0	13.7	5.8	38.57^{b}
18	27.3	11.3	7.5	2.8	1.6	10.1^{g}	11.5	2.4	1.6	1.2	0.1	3.36^{g}	73.8	33.2	28.1	11.1	3.3	29.92^{hi}
19	25.0	13.3	4.3	2.1	1.1	9.2^{h}	14.8	2.9	1.3	1.1	0.1	4.03^{d}	76.7	38.2	20.9	12.9	3.6	30.47^{gh}
20	23.5	13.8	6.5	2.3	0.9	9.4^{h}	13.6	3.3	8.9	1.2	0.1	7.43^{a}	58.0	35.0	22.1	12.2	3.6	26.18^{l}
21	17.1	8.4	4.6	1.7	0.6	6.5^{m}	12.6	1.8	1.7	1.0	0.1	3.42^{fg}	53.1	40.6	30.4	14.1	4.0	28.41^{jk}
22	17.1	10.6	6.6	2.3	0.9	7.5^{k}	12.4	3.2	1.6	1.2	0.1	3.69^{ef}	43.6	33.8	18.0	8.0	2.4	21.16^{n}
23	33.6	15.8	10.9	4.5	1.6	13.3^{c}	19.0	11.2	2.0	0.7	0.1	6.60^{b}	75.8	37.7	18.0	11.2	1.3	28.78^{j}
24	35.7	22.6	14.7	8.4	1.7	16.6^{b}	2.5	14	8.6	1.6	0.1	5.37^{c}	91.7	58.4	38.8	15.3	5.0	41.84^{a}
Mean	24.6	13.3	7.5	3.3	1.36	-	8.12	3.75	2.50	0.86	0.24	-	69.1	44.0	25.5	11.8	4.1	-
LSD α=0.05			0.8			-			0.6			-			2.1			-

در هر مقایسه حداقل یک حرف مشترک نشان دهنده عدم تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵٪ است.

In each column, at least one same letter indicates no significant difference at the 5% probability level

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

طول گیاهچه: الگوی تغییرات طول گیاهچه در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی در جدول ۳ نشان داده شده است. با تشدید تنش از شاهد به ۰/۶- مگاپاسکال، طول گیاهچه در تمامی ژنوتیپ‌ها با شیب معنی‌داری کاهش پیدا کرد. برای طول گیاهچه، بیش‌ترین طول برای ژنوتیپ ۲۴ به مقدار ۴۸/۱۷ میلی‌متر و کم‌ترین مقدار آن برای ژنوتیپ ۲۲، با طول ۲۴/۹۳ میلی‌متر مشاهده گردید (جدول ۳). تفاوت آشکار ژنوتیپ‌ها در میزان کاهش این صفت، حاکی از وجود تنوع در کارایی جذب آب و انتقال مواد به مریستم‌های رشدی است. در شرایط تنش به‌ویژه تنش خشکی، با کاهش جذب آب و اختلال فعالیت‌های آنزیمی و کاهش یافتن تولید اکسین و در نتیجه آن کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و هم‌چنین افزایش میزان اسید آبسیزیک که مانع رشد سلول‌های گیاهی می‌شود، طول گیاهچه کم می‌گردد (گوپتا و پالما[1]، ۲۰۲۱).

وزن تر و خشک گیاهچه: داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که وزن تر گیاهچه با افزایش شدت تنش خشکی، روند نزولی معنی‌داری را در تمام ژنوتیپ‌ها طی کرد. براساس مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ژنوتیپ ۳ با وزن ۱۷/۴ میکروگرم و ژنوتیپ ۷ با وزن ۵/۴ میکروگرم به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار را برای این صفت دارا بودند. الگوی تغییرات وزن خشک گیاهچه در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی در جدول ۳ ترسیم شده است. با افزایش شدت تنش، وزن خشک تمام ژنوتیپ‌ها با شیب تندی کاهش یافت. بر اساس میانگین کل، بیش‌ترین وزن خشک مربوط به ژنوتیپ ۲۰ با وزن ۷/۴۳ میکروگرم و کم‌ترین مقدار این صفت برای ژنوتیپ ۷ با وزن ۱/۱۰ میکروگرم بود . از رخدادهای رایج که در اکثر گیاهان در هنگام وقوع تنش اتفاق می‌افتد، کاهش وزن تر و خشک گیاهچه است (زمانی[2] و همکاران، ۲۰۱۸) که یکی از دلایل کاهش وزن در هنگام تنش خشکی، تحرک کم مواد غذایی و انتقال کمتر آن‌ها از لپه به محور جنینی است (خالید[3] و همکاران، ۲۰۰۱). در مطالعه زمانی و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی تاثیر سطوح تنش خشکی بر مولفه‌های جوانه‌زنی گیاه شنبلیله[4]، کاهش وزن تر و خشک گیاهچه گزارش شد.

بنیه بذر: داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که شاخص بنیه بذر با افزایش شدت تنش خشکی، روند نزولی معنی‌داری را در تمام ژنوتیپ‌ها طی کرده است. براساس مقایسه میانگین، ژنوتیپ‌های ۳ و ۲۴ به‌ترتیب با مقادیر ۴۲/۰۲ و ۴۱/۸۴ به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها از نظر حفظ بنیه بذر شناسایی شدند. در نقطه مقابل، ژنوتیپ ۲۲ با مقدار ۲۱/۱۶ کم‌ترین میانگین بنیه بذر را به خود اختصاص داد. از ویژگی‌های مطلوب کیفی بذر، بنیه بذر می‌باشد که در بالا بردن توانایی رشد رویشی گیاه و یکنواختی مزرعه موثر می‌باشد (مدندوست[5] و همکاران، ۲۰۰۵). شمسایی[6] و همکاران (۲۰۱۷) بیان نمودند که ایجاد تنش خشکی در گیاه مرزه، باعث کاهش بنیه بذر شد.

همبستگی بین صفات مربوط به جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی: از ضرایب همبستگی پیرسون برای بررسی وجود یا عدم وجود رابطه بین صفات مرتبط با جوانه‌زنی استفاده شد (جدول ۵). با توجه به نتایج بررسی ضرایب همبستگی، مشاهده می‌شود که بین صفت درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد و نیز این صفات با متوسط زمان جوانه‌زنی رابطه منفی دارند. بین صفات وزن تر و خشک گیاهچه رابطه مثبت و معنی‌دار وجود دارد، با توجه به اینکه گیاه تحت تنش خشکی می‌باشد و آب کمتری جذب نموده است این همبستگی منطقی می‌باشد. ضرایب همبستگی صفات نشان می‌دهد که بین طول ساقه‌چه و صفات طول ریشه‌چه، طول گیاهچه رابطه مستقیم و معنی‌دار وجود دارد. صفت بنیه بذر با همه صفات مورد بررسی بجز وزن خشک و تر گیاهچه همبستگی دارد اگرچه همبستگی این صفت با سرعت جوانه‌زنی منفی و معنی‌دار بود (جدول ۵). عساکره و خدارحم‌پور (۲۰۱۶) با مطالعه اکوتیپ‌های کاسنی، در شرایط تنش خشکی در محیط آزمایشگاهی گزارش کردند که بین صفات طول ریشه‌چه و طول گیاه‌چه و هم‌چنین بین طول گیاهچه و

[1] Gupta & Palma
[2] Zamani
[3] Khalid
[4] *Trigonella foenum* subsp. *graecum* L.
[5] Madandoustet
[6] Shamsaei

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

شاخص بنیه بذر، بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد.

تجزیه به مولفه‌های اصلی: در این تحقیق تجزیه به مولفه‌های اصلی با استفاده از میانگین ۹ صفت مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی (در سطوح تنش ۰/۴- و ۰/۶- مگاپاسکال) انجام شد. نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان دادند که سه مولفه اول دارای مقادیر ویژه بالای یک بوده‌اند و به ترتیب ۴۵/۳، ۲۶/۹۷ و ۱۵/۶۵ درصد از تغییرات را توجیه نمودند، به عبارتی سه مولفه اول با هم ۸۷/۹۱ درصد تغییرات کل را توجیه کردند (جدول ۶). برای مولفه اول صفات بنیه بذر، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه سهم بیش‌تری را به خود اختصاص دادند و با توجه به مطلوب بودن این صفات و داشتن ضرایب عاملی مثبت، این مولفه نمایانگر رشد، استحکام و بنیه اولیه گیاهچه است؛ پس ژنوتیپ‌هایی که از نظر این مولفه مقادیر بالاتری دارند، از بنیه قوی و رشد مطلوبی برخوردارند. در مولفه دوم درصد و سرعت جوانه‌زنی دارای ضریب مثبت و بالاتری بودند؛ هم‌چنین صفات گیاهچه‌ای (طول گیاهچه و طول ساقه‌چه) ضریب منفی و بالایی دارند، این مولفه نشان دهنده کارایی و سرعت فرآیند جوانه‌زنی است. لذا ژنوتیپ‌هایی که از نظر این مولفه مقایر بالایی دارند، از نظر جوانه‌زنی خوب هستند ولی طول گیاهچه کوتاه‌تری دارند. در مولفه سوم صفات وزن خشک و تر گیاهچه دارای ضریب مثبت و بالایی بودند، به عبارتی این مولفه ژنوتیپ‌ها را از نظر وزن گیاهچه تفکیک می‌کند (جدول ۶). این مولفه می‌تواند نشان‌دهنده کارایی فتوسنتز و ذخیره‌سازی مواد در گیاه باشد. قربانی[1] و همکاران (۲۰۲۳) با مطالعه بر روی صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در ژنوتیپ‌های برنج تحت تنش خشکی بیان نمودند که با انجام تجزیه به مولفه‌های اصلی ۲ مولفه اول ۶۱ درصد از تنوع کل را به خود اختصاص دادند. عساکره و خدارحم‌پور (۲۰۱۶) برای گروه‌بندی اکوتیپ‌های کاسنی با استفاده از تجزیه مولفه‌ها، گزارش دادند که ۳ مولفه، ۷۹ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کردند.

نمودار بای پلات مولفه اول در مقابل مولفه دوم: در ترسیم بای پلات از مولفه اول و دوم که بخش بزرگی از تغییرات را توجیه کردند، استفاده شد. با توجه به این شکل ژنوتیپ‌های ۲۴، ۳، ۱۱ و ۸ از نظر مولفه اول دارای مقادیر مثبت و بالا و از نظر مولفه دوم نیز مقادیر مثبت داشتند. بنابراین این ژنوتیپ‌ها از نظر اکثر صفات جوانه‌زنی مطلوب هستند و می‌توان آنها را جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱). ژنوتیپ‌های ۲، ۱۲، ۱۷، ۱ و ۱۴ از نظر صفات طول گیاهچه، ریشه‌چه و ساقه‌چه مطلوب هستند ولی از نظر صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی ضعیف هستند؛ در حالی که ژنوتیپ ۱۵ با مقدار مثبت و بالای مولفه دوم از نظر صفت سرعت و درصد جوانه‌زنی مطلوب می‌باشد. ژنوتیپ‌های ۵، ۷، ۱۳ و ۱۰ با مقدار منفی برای هر دو مولفه جزء ژنوتیپ‌هایی هستند که دارای متوسط زمان جوانه‌زنی بیشتر و از نظر سایر صفات جوانه‌زنی نیز ضعیف بوده‌اند، بنابراین این ژنوتیپ‌ها را می‌توان جزء ژنوتیپ‌های حساس به تنش خشکی گروه‌بندی کرد (شکل ۱).

[1] Ghorbani

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

جدول ۵. ضرایب همبستگی ساده پیرسون بین صفات مرتبط با جوانه‌زنی در ۲۴ژنوتیپ سیاهدانه تحت شرایط تنش خشکی

Table 5. Pearson's simple correlation coefficients among germination traits in 24 black cumin genotypes under drought stress conditions

	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ساقه‌چه Shoot length	طول ریشه‌چه Radicle length	طول گیاهچه Seedling length	وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight
درصد جوانه‌زنی Germination percentage	1							
متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	-0.58**	1						
سرعت جوانه زنی Germination rate	0.84**	-.88**	1					
طول ساقه‌چه Shoot length	-0.31ns	0.14ns	0.11ns	1				
طول ریشه‌چه Radicle length	-0.062ns	0.11ns	0.22ns	0.69**	1			
طول گیاهچه Seedling length	-0.078ns	-0.03ns	0.11ns	0.87**	0.95**	1		
وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	0.63**	-0.49*	0.60**	0.072ns	0.38*	0.29ns	1	
وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	0.37*	-0.57**	0.42*	-0.27ns	-0.05ns	-0.12ns	0.51**	1
بنیه بذر Seed vigor	0.16ns	-0.20ns	0.33ns	0.78**	0.94**	0.96**	0.45*	0.002ns

**و *: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪، ns: غیر معنی‌دار

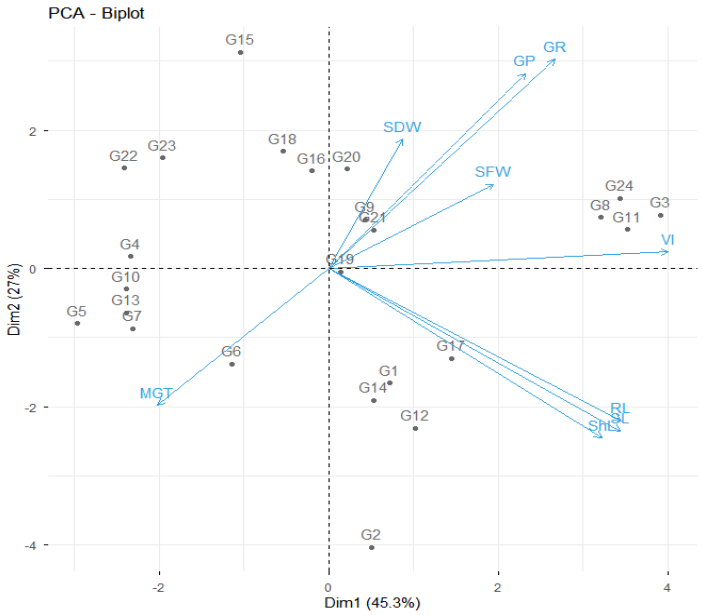
* and ** significant at 5 and 1% probability levels, respectively and ns is not significant.

جدول ۶. نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی صفات مرتبط با جوانه‌زنی در ۲۴ ژنوتیپ سیاهدانه تحت تنش خشکی

Table 6. Principal component analysis (PCA) results for traits associated with germination in 24 black cumin genotypes under drought conditions

Traits	صفات	مولفه ۱ Component1	مولفه ۲ Component2	مولفه ۳ Component3
Germination percentage (GP)	درصد جوانه‌زنی	0.27	**0.43**	-0.23
Germination rate (GR)	سرعت جوانه‌زنی	0.32	**0.46**	-0.19
Mean germination time (MGT)	متوسط زمان جوانه‌زنی	-0.24	-0.30	0.25
Shoot length (ShL)	طول ساقه‌چه	**0.38**	**-0.38**	0.03
Radicle Length (RL)	طول ریشه‌چه	**0.41**	-0.34	0.05
Seedling length (SL)	طول گیاهچه	**0.41**	**-0.36**	0.03
Seedling fresh weight (SFW)	وزن تر گیاهچه	0.23	0.19	**0.62**
Seedling dry weight (Sdw)	وزن خشک گیاهچه	0.10	0.29	**0.66**
Seed vigor (VI)	بنیه بذر	**0.47**	0.04	-0.16
Eigen value	مقادیر ویژه	4.08	2.43	1.41
Relative variance (%)	درصد واریانس	45.30	26.97	15.65
Cumulative variance (%)	درصد واریانس تجمعی	45.30	72.27	**87.91**

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

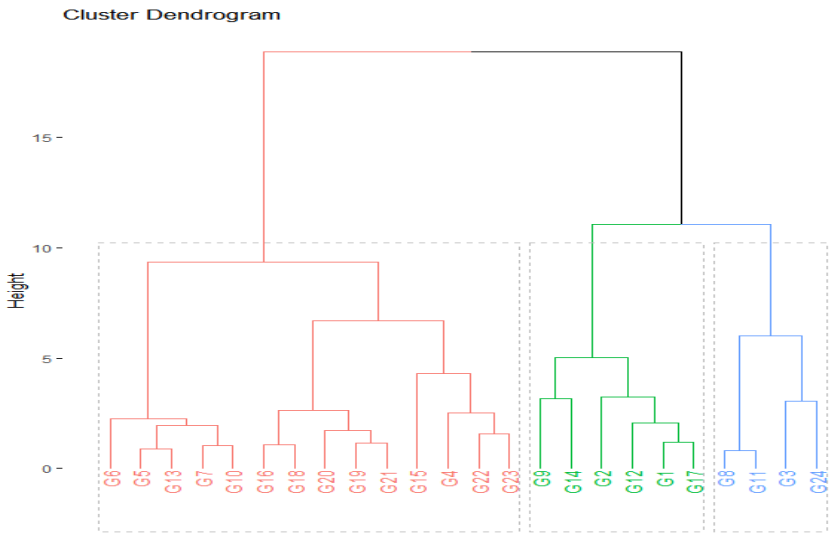


شکل ۱. نمودار بای پلات مولفه اول در مقابل مولفه دوم تجزیه به مولفه‌های اصلی ۲۴ ژنوتیپ سیاه دانه برای صفات مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی

GP (درصد جوانه‌زنی)؛ GR (سرعت جوانه‌زنی)؛ MGT (میانگین مدت زمان جوانه‌زنی)؛ ShL (طول ساقه‌چه)؛ SL (طول گیاهچه)؛ RL (طول ریشه‌چه)؛ SFW (وزن تر گیاهچه)؛ SDW (وزن خشک گیاهچه)؛ VI (بنیه بذر)

Figure 1. Biplot of PC1 vs. PC2 from principal component analysis (PCA) of 24 *Nigella sativa* genotypes for germination-related traits under drought stress

GP (Germination percentage); GR (Germination rate time); MGT (Mean germination time); ShL (Shoot length); SL (Seedling length); RL (Radicle length); SFW (Seedling fresh weight); SDW (Seedling dry weight); VI (Seed vigor)



شکل ۲. تجزیه خوشه‌ای به روش ward، بر روی ۲۴ ژنوتیپ سیاهدانه بر اساس صفات مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی

Figure 2. Dendrogram from Ward's hierarchical clustering of 24 *Nigella sativa* genotypes based on germination-related traits under drought stress condition.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

تجزیه خوشه‌ای: گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس صفات مرتبط با جوانه‌زنی با استفاده از تجزیه خوشه‌ای به روش ward در شرایط تنش خشکی انجام شد و ژنوتیپ‌ها به سه گروه تقسیم شدند (شکل۲). نتیجه تجزیه واریانس برای صفات مختلف حاکی از این بود که بین گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای همه صفات به‌جز وزن خشک گیاهچه اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۷). هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین گروه‌ها بر اساس آماره‌های چند متغیره (اثرپیلای، لاندای ویلک، اثر لاولی-هتلینگ و بزرگترین ریشه روی) حاکی از اختلاف معنی‌دار بین گروه‌ها در سطح احتمال یک درصد می باشد (جدول ۸)، که نشان دهنده این است که گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها به‌خوبی انجام گرفته است. گروه اول شامل ژنوتیپ‌های ۸ (فریدون شهر ۲)، ۳ (سمیرم)، ۲۴ (۲۳۷۶۸) و ۱۱ (Nige53) می‌باشد که از نظر صفات مطلوب جوانه‌زنی دارای میانگین بهتری بودند، بنابراین این گروه به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی نامگذاری می‌شوند. گروه دوم شامل ژنوتیپ‌های ۹ (اصفهان)، ۲ (چهارمحال و بختیاری)، ۱ (فریدون شهر۱)، ۱۴ (Nige61)، ۱۲ (Nige59) و ۱۷ (Nige72) می‌باشد که تقریبا بینابین بودند که به‌عنوان ژنوتیپ‌های نیمه‌متحمل و سایر ژنوتیپ‌ها که شامل ۱۴ ژنوتیپ بودند، در گروه سوم و به‌عنوان ژنوتیپ‌های حساس به تنش خشکی قرار گرفتند. به‌طور خلاصه، ژنوتیپ‌های متحمل شامل (۸، ۳، ۱۱ و ۲۴)، نیمه‌متحمل شامل (۱، ۲، ۹، ۱۲، ۱۴ و ۱۷) و حساس شامل (۴، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳) طبقه‌بندی می‌شوند.

جدول ۷. تجزیه واریانس و میانگین صفات مرتبط با جوانه‌زنی در گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای.

Table 7. Analysis of variance (ANOVA) and mean values of germination-related traits in groups derived from cluster analysis

صفات Traits	میانگین مربعات بین گروه ها MS (B)	میانگین مربعات درون گروه‌ها MS (W)	میانگین صفات در گروه‌ها Mean of traits in group		
			گروه ۱ Group1	گروه ۲ Group2	گروه ۳ Group3
درصد جوانه‌زنی Germination percentage	336.72**	41.14	54a	37.44b	42.43b
سرعت جوانه‌زنی Germination rate	15.07**	1.25	9.13a	5.69b	6.53b
متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	0.07**	0.01	10.66a	10.9b	10.83b
طول ساقه‌چه Shoot length	22.99**	0.79	8.88a	8.88a	6.07b
طول ریشه‌چه Radicle length	48.18**	1.67	12.66a	12.24a	8.36b
طول گیاهچه Seedling length	134.98**	3.94	21.47a	20.96a	14.37b
وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	0.000004*	0.000001	0.004a	0.003b	0.002c
وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	0.00000001	0	0.00055a	0.0006a	0.00052a
بنیه بذر Seed vigor	48.28**	1.67	12.11a	8.36b	6.58c

** و *: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪

میانگین‌هایی که در هر ردیف دارای حروف مشابهی هستند از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

MS (B) and MS (W): between and within mean square, respectively

* and ** significant at 5 and 1% probability level, respectively

In each row, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

جدول ۸. جدول مقایسه بین گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای با استفاده از آزمون‌های چند متغیره برای ۲۴ ژنوتیپ سیاه دانه بر اساس صفات مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی

Table 8. Multivariate tests for comparison among clusters derived from cluster analysis for 24 *Nigella sativa* genotypes based on germination-related traits under drought stress condition

آزمون Test	درجه آزادی df	مقدار آماره Statistic Value	F
Pillai's trace	2	1.62	6.67**
Wilks's lamda	2	0.03	7.20**
Hotelling-Lawley trace	2	11.54	7.70**
Roy's largest root	2	8.94	13.91**

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ : significant at 1% probability level

طبقه‌بندی می‌شوند. ژنوتیپ‌های متفاوت از نظر منشا جغرافیایی، با در کنار هم قرار گرفتن در گروه‌های مشابه حاصل از تجزیه خوشه‌ای، به این موضوع اشاره دارند که تنوع جغرافیایی با تنوع ژنتیکی مطابقت ندارد، مشابه این نتیجه در تحقیق احمدی[1] و همکاران (۲۰۲۴) در ارتباط با گیاه سیاهدانه گزارش شد. نتایج تجزیه کلاستر تقریبا با نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی هم‌خوانی داشت و هر دو آنالیز نشان داد که بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی از لحاظ صفات مرتبط با جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی تنوع وجود دارد.

نتیجه‌گیری

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید گیاهان دارویی از جمله سیاهدانه در مناطق خشک و نیمه خشک ایران است. نتایج این تحقیق نشان داد که غربالگری آزمایشگاهی با استفاده از پلی اتیلن گلیکول، روشی کارآمد و مقرون به‌صرفه و سریع نسبت به روش‌های پرهزینه و زمان‌بر مزرعه‌ای برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی باشند. تنش خشکی درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن تر و خشک گیاهچه و بنیه بذر را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش ولی صفت سرعت متوسط جوانه‌زنی افزایش داد، که این نتایج حساسیت مراحل اولیه رشد گیاه را به محدودیت آبی نشان داد. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی صفات در سطوح تنش ۰/۴- و ۰/۶- مگاپاسکال، صفات کلیدی موثر بر تحمل به تنش خشکی شناسایی شدند. هم‌چنین تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان‌دهنده تاثیر گذار بودن سه مولفه اول در تبیین واریانس داده بود. بر اساس نتایج بای‌پلات و تجزیه خوشه‌ای، ژنوتیپ‌های ۳ (سمیرم)، ۸ (فریدون‌شهر ۲)، ۱۱ (Nige53) و ۲۴ (۲۳۷۶۸) به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی شناسایی شدند. همبستگی قوی بین بنیه بذر با طول گیاهچه و طول ریشه‌چه نشان می‌دهد که این صفات می‌توانند به عنوان شاخص‌های غیرمستقیم برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل مورد استفاده قرار گیرند. عدم تطابق تنوع جغرافیایی با تنوع ژنتیکی مؤید این مطلب است که غربالگری مستقیم ژنوتیپ‌ها صرف‌نظر از منشأ جغرافیایی آن‌ها ضروری می‌باشد. اگرچه غربالگری در مرحله جوانه‌زنی به عنوان یک روش کارآمد برای شناسایی مقدماتی ژنوتیپ‌های متحمل شناخته شده است اما تأکید می‌شود که نتایج این مطالعه جنبه مقدماتی داشته و تأیید نهایی تحمل به خشکی ژنوتیپ‌های معرفی‌شده، نیازمند انجام آزمایش‌های تکمیلی در شرایط مزرعه می‌باشد. در مجموع، ژنوتیپ‌های متحمل شناسایی شده در این پژوهش، منابع ژنتیکی ارزشمندی برای برنامه‌های به‌نژادی جهت توسعه ارقام متحمل به خشکی سیاهدانه محسوب می‌شوند.

[1] Ahmadi

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

اکرم اورکی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

احسان شهبازی: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

کرامت اله سعیدی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

فریبا رفیعی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهرکرد دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانهٔ رساله دانشجویی احسان شهبازی و همچنین پژوهانهٔ برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت مالی/ حمایت معنوی / همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

References

Abdul Baki, A.A., & Anderson, J.D. (1973). Vigor determination in soybean seed by multiple criteria 1. *Crop Science*, *13*(6), 630-633. https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x

Ahmadi, K., Shahbazi, E., Golkar, P., & Saeidi, K. (2024). Investigation of genetic variation for seed yield and yield components in some *Nigella sativa* L. genotypes. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *40*(3), 435-448. (In Persian) https://doi.org/10.22092/ijmapr.2024.131917

Asakereh, F., & Khodarahmpour, Z. (2016). Study of genetic diversity of tolerance to drought stress in chicory ecotypes (*Cichorium intybus* L.) via multivariate analysis. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 2(3), 13-25 (In Persian).

Bahrami, H., Razmjoo, J., & Jafari, A.O. (2012). Effect of drought stress on germination and seedling growth of sesame cultivars (*Sesamum indicum* L.). *International Journal of AgriScience*, 2(5), 423-428.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

Balouchi, H., Yadavi, A., & Movahhedi Dehnavi, M. (2012). Effect of osmotic stress on seed germination indices of *Nigella sativa* and *Silybum marianum*. *Journal of Crop Ecophysiology*, 5(20), 97-110. (In Persian)

Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F.W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A.M., Francia, E., & Stanca, A.M. (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, *105*(1-2), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.07.004

El-Badri, A.M., Batool, M., A.A. Mohamed, I., Wang, Z., Khatab, A., Sherif, A., Ahmad, H., Khan, M.N., Hassan, H.M., Elrewainy, I.M., Kuai, J., Zhou, G., & Wang, B. (2021). Antioxidative and metabolic contribution to salinity stress responses in two rapeseed cultivars during the early seedling stage. *Antioxidants*, *10*(8), 1227. https://doi.org/10.3390/antiox10081227

Ellis, R. H., & Roberts, E. H. (1981).The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, *9*(2), 373-409.

Fakheri, B.A., Mousavi Nick, S.M., & Mohammadpour Vashvaei, R. (2017). Effect of drought stress induced by polyethylene glycol on germination and morphological properties of fennel and ajowan. *Crop Science Research in Arid Regions*, 1(1), 35-50. (In Persian) https://doi.org/10.22034/csrar.01.01.04

Ghorbani, E., Khodarahmpour, Z., & Gilani, A. (2023). Study of genetic variation of rice genotypes on the germination components and seedling growth in the drought stress condition. *Journal of Plant Production Science*, 12(2), 61-76. (In Persian)

Gill, P. K., Sharma, A. D., Singh, P., & Bhullar, S. S. (2003). Changes in germination, growth and soluble sugar contents of *Sorghum bicolor* (l.) Moench seeds under various abiotic stresses. *Plant Growth Regulation*, *40*(2), 157-162. https://doi.org/10.1023/a:1024252222376

Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C. D., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: risks and responses. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Report*, *110*(2), 3-36.

Gupta, D. K., & Palma, J. M. (Eds.). (2021). *Plant Growth and Stress Physiology*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78420-1

Hassanien, M. F. R., Mahgoub, S. A., & El-Zahar, K. M. (2014). Soft cheese supplemented with black cumin oil: Impact on food borne pathogens and quality during storage. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *21*(3), 280-288. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.10.005

Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*(16), 5692. https://doi.org/10.3390/app10165692

Kayacetin, F. (2022). Response to Direct Selection against drought stress in black cumin (*Nigella sativa* L.). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 6888187. https://doi.org/10.1155/2022/6888187

Khalid, M.N., Iqbal, H.F., Tahir, A., & Ahmad, A.N. (2001).Germination potential of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) under saline condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *4*(4), 395-396. https://doi.org/10.3923/pjbs.2001.395.396

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

Khan, A.A., Wang, Y.F., Akbar, R., &Alhoqail, W.A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1547452. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547452

Khan, M.N., Zhang, J., Luo, T., Liu, J., Ni, F., Rizwan, M., & Hu, L. (2019). Morpho-physiological and biochemical responses of tolerant and sensitive rapeseed cultivars to drought stress during early seedling growth stage. *Acta Physiologiae Plantarum*, *41*, 25. https://doi.org/10.1007/s11738-019-2812-2

Khodarahmpour, Z. (2011). Effect of drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) on germination indices in corn (*Zea mays* L.) hybrids. *African Journal of Biotechnology*, *10*(79), 18222-18227. https://doi.org/10.5897/ajb11.2639

Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., Amin Ghafori, A., & Shabahang, J. (2012). Study the germination characteristics of black seed (*Nigella sativa* L.) under drought stress condition in different salicylic acid levels. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *10*(4), 709-725. (In Persian) https://doi.org/10.22067/gsc.v10i4.20382

Kiralan, M., Ulas, M., Ozaydin, A., Ozdemir, N., Ozkan, G., Bayrak, A., & Ramadan, M. (2017). Blends of cold pressed black cumin oil and sunflower oil with improved stability: a study based on changes in the levels of volatiles, tocopherols and thymoquinone during accelerated oxidation conditions. *Journal of Food Biochemistry*, *41,* e12272. https://doi.org/10.1111/jfbc.12272

Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., & Kondracka, K. (2013). Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics*, *27*, 463-477. https://doi.org/10.2478/intag-2013-0017

Madandoust, M., Nour-Mohamadi, G., Darvish, F., & Emam, Y. (2005). Effect of environment factors during seed development of female inbred parent on vigor of the hybrid corn seed. *Agricultural Science* (Tabriz), *15*(3), 26-35. (In Persian)

Michel, B.E., & Kaufmann, M.R. (1973).The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, *51*(5), 914-916. https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914

Muscolo, A., Sidari, M., Anastasi, U., Santonoceto, C., & Maggio, A. (2014). Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes. *Journal of Plant Interactions*, *9*(1), 354-363. https://doi.org/10.1080/17429145.2013.835880

Payus, C., Ann Huey, L., Adnan, F., BesseRimba, A., Mohan, G., Kumar Chapagain, S., & Fukushi, K. (2020). Impact of extreme drought climate on water security in North Borneo: Case study of Sabah. *Water*, *12*(4), 1135. https://doi.org/10.3390/w12041135

Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, *128*(6), 450-459. https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2

Shamsaie, M., Sodaei Zadeh, H., & Tajamolian, M. (2017). Evaluation of the effects of drought stress of mother plants on some seed germination indices of *Satureja hortensis*. *Desert Management*, *4*(8), 27-35. (In Persian) https://doi.org/10.22034/jdmal.2017.24659

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]

Vafaee, F., Nooryazdan, H., & Karimizadeh, R. (2024). Evaluation of drought stress effect on germination characteristics of some advanced dryland bread wheat lines. *Iranian Journal of Seed Research*, *11*(1), 223-239. (In Persian) http://dx.doi.org/10.61186/yujs.11.1.223

Vicente-Serrano, S. M., Pricope, N. G., Toreti, A., Morán□Tejeda, E., Spinoni, J., Ocampo□Melgar, A., & Alibakhshi, S. (2024). The Global Threat of Drying Lands: Regional and Global Aridity Trends and Future Projections. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). *Bonn, Germany*.

Wijewardana, C., Alsajri, F.A., & Reddy, K.R. (2018). Soybean seed germination response to in vitro osmotic stress. *Seed Technology*, *39*(2), 143-154.

Xie, X., Zhang, X., & He, Q. (2013). Identification of drought resistance of rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination stage under PEG stress. *Journal of Food Agriculture & Environment*, *11*(2), 751-756.

Yan, A., & Chen, Z. (2020).The control of seed dormancy and germination by temperature, light and nitrate. *The Botanical Review*, *86*(1), 39-75. https://doi.org/10.1007/s12229-020-09220-4

Yimer, E.M., Tuem, K.B., Karim, A., Ur-Rehman, N., & Anwar, F. (2019). *Nigella sativa* L. (Black cumin): A promising natural remedy for wide range of illnesses, *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1528635. https://doi.org/10.1155/2019/1528635

Yu, H., Zhang, Q., Sun, P., & Song, C. (2018). Impact of droughts on winter wheat yield in different growth stages during 2001–2016 in Eastern China. *International Journal of Disaster Risk Science*, *9*, 376-391. https://doi.org/10.1007/s13753-018-0187-4

Zamani, Z., Amiri, H., & Ismaili, A. (2018). Effect of drought stress on germination characteristics of two populations of Fenugreek (*Trigonella foenum* subsp. graceum L.). *Nova Biologica Reperta*, *5*(2), 183-191. (In Persian) https://doi.org/10.29252/nbr.5.2.191

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-09-17]