

Research Paper

Antioxidant enzyme responses of two-year-old *Pistacia atlantica* Desf. seedlings to combined drought and dust Stress**Fatemeh Pourfallahi¹, Babak Pilevar^{*2}, Zahra Mirazadi³, Seyed Vahid Seyedna⁴**

1- PhD Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, I. R. Iran. (f.pourfallahi@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Professor, Forestry Department, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, I. R. Iran. (b.pilehvar@lu.ac.ir)

3- Assistant Professor, Forestry Department, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, I. R. Iran. (z_mirazadi@yahoo.com)

4- Assistant Professor, Forestry Department, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, I. R. Iran. (sayedena.v@lu.ac.ir)

Received: 07 October 2025

Revised: 25 February 2025

Accepted: 15 April 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Over the past two decades, the severity of drought and the frequency of dust storms have increased markedly in Iran, particularly in the western and southwestern provinces, imposing substantial pressure on natural ecosystems. The Zagros forests, one of the country's most valuable and vulnerable forest ecosystems, are highly susceptible to the combined impacts of drought and dust deposition. These environmental stressors reduce tree growth, disrupt physiological processes, and accelerate forest decline. Wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.), an ecologically and economically important tree species of Iran's arid and semi-arid regions, plays a crucial role in maintaining ecosystem stability. Therefore, this study aimed to investigate the combined effects of drought and dust stress on the antioxidant enzyme activities of wild pistachio seedlings in order to better understand their defense mechanisms and provide insights for improving their resilience to environmental stress.

Material and Methods: This study was conducted from March 2023 to December 2023 in the greenhouse of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University. A factorial experiment was arranged as a split-plot design within a randomized complete block design using 384 wild pistachio seedlings. Drought stress was applied at three irrigation levels corresponding to 100% (control), 75%, and 50% of field capacity, while dust stress consisted of four concentrations: 0, 350, 750, and 1,500 $\mu\text{g m}^{-3}$. Growth chambers with transparent plastic covers were constructed inside the greenhouse, and the seedlings were placed within these chambers. The potting medium consisted of equal proportions of agricultural soil, sand, and farmyard manure, similar to the substrate commonly used in forest nurseries. At the end of the experiment, leaf samples were collected and the activities of catalase (CAT), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), and ascorbate peroxidase (APX) were determined under laboratory conditions.

Results: Drought and dust stresses significantly affected the activities of all antioxidant enzymes at the 1% probability level. However, the interaction between the two stressors was not significant for APX activity, indicating that each stress factor independently influenced this enzyme. Catalase activity increased markedly with increasing stress intensity. Under severe drought (50% of field

capacity), APX and SOD activities showed a slight decline at the initial dust concentration ($350 \mu\text{g m}^{-3}$), which may reflect temporary impairment of the antioxidant defense system under oxidative stress. With further increases in dust concentration to 750 and $1,500 \mu\text{g m}^{-3}$, SOD activity increased substantially, suggesting activation of compensatory defense mechanisms to counteract reactive oxygen species. Although POD activity was significantly influenced by both drought and dust stress, its response did not exhibit a consistent increasing or decreasing trend.

Conclusion: Wild pistachio seedlings responded to the combined effects of drought and dust stress by significantly enhancing the activities of CAT, POD, and SOD, demonstrating an effective antioxidant defense mechanism. The marked increase in SOD activity, as the first line of defense against reactive oxygen species, highlights its critical role in protecting cellular integrity and enhancing stress tolerance. Nevertheless, under severe drought and dust conditions, physiological performance and seedling growth were substantially impaired, increasing the likelihood of seedling mortality. Consequently, mitigating dust sources through wetland restoration, securing environmental water allocations, establishing stress-tolerant vegetation in dust-emitting areas, and strengthening regional cooperation for transboundary dust control and sustainable water resource management are recommended to reduce environmental stress and improve the resilience of Zagros forest ecosystems.

Keywords: Peroxidase; catalase; superoxide dismutase; Zagros forests.

How to Cite This Article: Pourfallahi, F., Pilevar, B., Mirazadi, Z., and Seyedna, S. V. (2026). Antioxidant enzyme responses of two-year-old *Pistacia atlantica* Desf. seedlings to combined drought and dust Stress. Forest Research and Development, 12(2), 203-218. DOI: [10.30466/frd.2026.56637.1785](https://doi.org/10.30466/frd.2026.56637.1785)



Copyright ©2024 Pourfallahi et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نهال‌های دوساله بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) به تنش همزمان خشکی و گردوغبار

فاطمه پورفلاحی^۱، بابک پیلهور^{۲*}، زهرا میرآزادی^۳ و سید وحید سیدنا^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه جنگلداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه لرستان ملایر، ملایر، ایران. (f.pourfalahi@gmail.com)

۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. (b.pilehvar@lu.ac.ir)

۳- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. (z_mirazadi@yahoo.com)

۴- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. (sayedena.v@lu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

چکیده

مقدمه و هدف: طی دو دهه اخیر، شدت خشکسالی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در ایران، به‌ویژه در استان‌های غربی و جنوب‌غربی، روندی افزایشی داشته و فشار قابل‌توجهی بر بوم‌سازگان‌های طبیعی وارد کرده است. جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از ارزشمندترین و حساس‌ترین بوم‌سازگان‌های کشور، در برابر تنش‌های هم‌زمان ناشی از خشکسالی و گردوغبار آسیب‌پذیر هستند. این تنش‌ها با کاهش رشد، اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک و تسریع زوال درختان، پایداری زیست‌بوم را تهدید می‌کنند. بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) از گونه‌های مهم جنگلی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که به‌دلیل نقش بوم‌شناختی و اقتصادی خود، در حفظ تعادل این بوم‌سازگان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی اثر هم‌زمان تنش‌های خشکی و گردوغبار بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نهال‌های بنه، به‌منظور شناخت بهتر سازوکارهای دفاعی این گونه و ارائه راهکارهای مدیریتی برای افزایش مقاومت آن در برابر تنش‌های محیطی انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در بازه زمانی اسفندماه ۱۴۰۱ تا آذرماه ۱۴۰۲ در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با استفاده از طرح کرت‌های خردشده (اسپلیت پلات) در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با ۳۸۴ نهال بنه اجرا شد. نهال‌ها تحت تنش خشکی در سه سطح شامل ۱۰۰ درصد (بدون تنش)، ۷۵ درصد و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و همچنین تنش گردوغبار در چهار سطح صفر، ۳۵۰، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب قرار گرفتند. اتاقک‌های رشد با پوشش پلاستیکی و ابعاد مشخص در داخل گلخانه احداث و گلدان‌ها در داخل این اتاقک‌ها قرار گرفتند. خاک

مورد استفاده برای گلدان‌ها ترکیبی برابر از خاک زراعی، ماسه و کود دامی بود که مشابه خاک نهالستان جنگلی تهیه شده بود. در پایان دوره آزمایش، نمونه‌برداری از برگ‌های نهال انجام شد و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تأثیر تنش‌های خشکی و گردوغبار بر فعالیت آنزیم‌های مذکور در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است. هرچند اثر متقابل این دو تنش تنها در مورد آنزیم آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار نبود، که نشان‌دهنده تأثیر مستقل هر تنش بر فعالیت این آنزیم است. آنزیم کاتالاز با افزایش شدت تنش، روند افزایشی قابل توجهی نشان داد. در شرایط تنش خشکی با سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در پاسخ به افزایش غلظت گردوغبار ابتدا کاهش مختصری را در غلظت ۳۵۰ میکروگرم بر مترمکعب نشان دادند. این کاهش اولیه احتمالاً ناشی از آسیب موقتی به سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه یا مهار عملکرد آنزیم در اثر فشار استرس اکسیداتیو بوده است که منجر به کاهش موقت کارایی آنزیم می‌شود با افزایش بیشتر غلظت گرد و غبار به سطوح ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب، فعالیت SOD به‌طور قابل توجهی افزایش یافت که نشان‌دهنده فعالسازی مکانیزم‌های جبرانی و تقویت پاسخ آنتی‌اکسیدانی در گیاه برای مقابله با آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن است. هرچند فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت تأثیر تنش‌های خشکی و گردوغبار در سطح آماری معنی‌دار قرار گرفت، اما روند تغییرات آن در پاسخ به افزایش شدت تنش، الگوی مشخص افزایشی یا کاهشی نداشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که نهال‌های بنه در مواجهه با تنش هم‌زمان خشکی و گردوغبار، با افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز، پاسخ دفاعی مؤثر و سازگارانه‌ای از خود نشان می‌دهند. افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز به‌عنوان نخستین خط دفاعی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن، نقش مهمی در حفظ یکپارچگی سلولی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ایفا می‌کند و بیانگر توان سازگاری این گونه با شرایط نامساعد محیطی است. با این حال، در سطوح بالای تنش خشکی و گردوغبار، عملکردهای فیزیولوژیک گیاه به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته و رشد نهال‌ها محدود می‌شود؛ به‌گونه‌ای که احتمال خشکیدگی آن‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، کاهش منابع تولید ریزگرد از طریق احیای تالاب‌ها، تأمین حق‌آبه، استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم در کانون‌های گردوغبار و توسعه همکاری‌های منطقه‌ای برای مدیریت منابع آب و کنترل کانون‌های فرامرزی گردوغبار، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش شدت این تنش‌ها، بهبود کیفیت هوا و افزایش پایداری جنگل‌های زاگرس ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، جنگل‌های زاگرس.

تغییرات اقلیمی در خاورمیانه و ایران با افزایش دما، کاهش بارندگی و تغییر الگوهای بارش موجب تشدید خشکی و بیابان‌زایی شده است (IPCC, 2021). در این شرایط، کاهش پوشش گیاهی و رطوبت خاک زمینه‌ساز افزایش رخداد ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار شده که پیامدهای متعددی مثل کاهش کیفیت هوا، اختلال در فتوسنتز گیاهان، افت عملکرد کشاورزی و تهدید سلامت انسان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به همراه دارد (Middleton, 2017). بررسی‌های منطقه‌ای نشان داده‌اند که شدت خشکسالی و افزایش گرد و غبار در ایران طی دو دهه اخیر روندی فزاینده داشته و استان‌های غربی و جنوب غربی بیشترین آسیب‌پذیری را تجربه کرده‌اند (Shahsavani et al., 2020; Zoljoodi & Didevarasl, 2013). اهمیت بررسی این پدیده‌ها در کشورمان دوچندان است؛ زیرا همزمانی تنش خشکی و ریزگردها نه تنها بر پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی و زراعی اثر منفی می‌گذارد بلکه توسعه پایدار و امنیت غذایی را نیز با چالش جدی مواجه می‌کند. بنابراین، تحلیل پیوند تغییر اقلیم، خشکی و ریزگردها برای تدوین راهبردهای مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی و انسانی ضروری است. ریزش گرد و غبار (ریزگرد) و تنش خشکی چالش‌های عمده محیطی هستند که سلامت و رشد گیاهان را در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به ویژه در خاورمیانه و ایران به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. گرد و غبار یا ریزگرد به ذراتی بسیار کوچک و سبک سیلتی و رسی یا ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر فرسایش بادی و بیابان‌زایی توسط باد تا مسافت بسیار طولانی جابه‌جا و انتقال می‌یابند (Wali et al, 2014)، که در سال‌های اخیر شدت یافته و بیشتر در کشور عراق

و در مناطق غربی ایران بروز کرده و موجب خسارت می‌شود (Yaghmaei et al., 2022) که می‌تواند از منابع مختلفی مانند زمین‌های خشک، مناطق بیابانی و فعالیت‌های انسانی منتشر شوند و اثرهای مخربی بر بوم‌سازگان‌های طبیعی و کشاورزی داشته باشند (Ahmadi et al., 2020). این ذرات علاوه بر کاهش کیفیت هوا و دید، سبب اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان می‌شوند. ریزگردها با ایجاد انسداد بر روی سطح برگ‌ها مانع تبادل گازها و کاهش فتوسنتز می‌شوند و می‌توانند موجب افزایش استرس اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی شوند (Shahrokhi et al., 2018). تنش خشکی یکی از عوامل محدودکننده رشد و توسعه گیاهان در مناطق خشک است که سبب کاهش دسترسی به آب می‌شود و به تبع آن، اختلال در تعادل آبی و کاهش عملکرد فتوسنتزی را به دنبال دارد. خشکی سبب افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی شده که می‌تواند به آسیب‌های ساختاری در غشاهای پروتئین‌ها و DNA منجر شود (Mittler, 2002). برای مقابله با این اثرهای مضر، گیاهان از سامانه‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌کنند که فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز را افزایش می‌دهند تا گونه‌های فعال اکسیژن را خنثی کنند و به حفظ هموستاز سلولی کمک کنند. گونه درختی بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) از خانواده گیاهی Anacardiaceae و یکی از مهم‌ترین گونه‌های بومی جنگل‌های زاگرس است که سطحی معادل ۲/۴ میلیون هکتار از مساحت ایران را به خود اختصاص داده (Yousefvand et al., 2023) و مانند کمربندی اطراف کویرهای ایران را احاطه کرده است (Mirzaei et al., 2014). این گونه کم‌نیاز و مقاومت بالایی به گرما و

بر گونه ارغوان گزارش کردند که تنش خشکی سبب افزایش مقدار آنزیم‌های آنتی اکسیدانی می‌شود. Naji et al (2024) و Nawaz et al. (2022) به ترتیب تاثیر گرد و غبار را بر گونه‌های بنه و *Bombax ceiba* بررسی کردند و نتایج آنان نشان‌دهنده افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در پاسخ به افزایش گرد و غبار بود. پژوهش‌های متعددی در گونه‌های مختلف گیاهی افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی تحت تنش‌های ترکیبی خشکی و آلودگی گردوغبار را گزارش کرده‌اند. به‌طور مثال، Ahmadi et al (2020) در نهال‌های *Quercus brantii* افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را به‌عنوان واکنشی محافظتی در برابر استرس‌های ترکیبی تایید کردند. همچنین Sharma et al. (2019) در پژوهشی بر نهال‌های *Eucalyptus camaldulensis* نشان دادند که افزایش فعالیت این آنزیم‌ها نقش حیاتی در مقابله با استرس‌های اکسیداتیو ایفا می‌کند. علاوه بر این، Mokhtar (2014) و Pérez-López et al. (2009) نیز در پژوهش‌های خود روی *Acacia nilotica* و *Pinus halepensis* افزایش فعالیت SOD را به‌عنوان مکانیسم سازگاری گیاهان با خشکی گزارش کرده‌اند.

با این حال، اطلاعات محدودی در خصوص تاثیر همزمان ریزگرد و خشکی بر این آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در نهال‌های بنه وجود دارد که بررسی حاضر به آن می‌پردازد. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرهای همزمان ریزگرد و تنش خشکی بر فعالیت آنزیم‌های کلیدی آنتی اکسیدانی در نهال‌های دو ساله درخت بنه است. نتایج این بررسی می‌تواند به درک بهتر سازگاری زیستی این گونه با شرایط محیطی نامطلوب کمک کرده و راهنمایی‌های علمی لازم برای حفظ و توسعه پوشش گیاهی، بهبود مدیریت منابع طبیعی و احیای پوشش گیاهی مناطق خشک ارائه دهد.

سرما دارد. و حضور آن در مناطق سنگلاخی و صخره-ها، بیانگر پذیرش شرایط سخت محیطی، در طول سال-ها می‌باشد (Karimi et al., 2019). می‌توان گفت حضور و حفظ بنه در جنگل‌های زاگرس، با توجه به نقش حمایتی و حفاظتی این جنگل‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است (Iranmanesh et al., 2019). درخت بنه (*Pistacia atlantica*) به‌عنوان یکی از گونه‌های بومی و مقاوم به شرایط سخت اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران شناخته می‌شود و نقش مهمی در تثبیت خاک، حفظ تنوع زیستی و تولید منابع اقتصادی دارد (Karimi et al., 2019) و سطحی معادل ۲/۴ میلیون هکتار از جنگل‌های کشور را به خود اختصاص داده است (Esmaili et al, 2022). با وجود مقاومت نسبی این گونه، شواهد میدانی در جنگل‌های زاگرس حاکی از بروز زوال تدریجی و کمابیش قابل توجه در میان درختان آن است. بررسی اثرهای ترکیبی این دو عامل استرس‌زا بر نهال‌های دو ساله بنه، می‌تواند شناخت عمیق‌تری از مکانیسم‌های دفاعی گیاه در شرایط طبیعی ارائه دهد و در بهبود مدیریت و احیای این گونه ارزشمند موثر باشد. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که تنش‌های محیطی، به ویژه خشکی و آلودگی‌های جوی، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی را به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهند. این آنزیم‌ها به‌عنوان شاخص‌های زیستی حساس در ارزیابی مقدار استرس در گیاهان شناخته می‌شوند و تغییرات در فعالیت آنها می‌تواند نشانگر پاسخ‌های تطبیقی یا آسیب‌های سلولی باشد. در پژوهش‌های مختلفی پاسخ آنزیم‌های درختان به تنش خشکی بررسی شده است. Jafaryan et al. (2024)، Yaghmaei et al. (2022) و Xiong (2022) با بررسی تاثیر این آنزیم‌ها بر روی درخت بلوط تحت تنش خشکی و Saeidi Abueshaghi et al. (2021) تاثیر آن

مواد و روش

منطقه مورد بررسی

این پژوهش در بهار و تابستان و پاییز ۱۴۰۲ در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، به صورت آزمایش فاکتوریل با استفاده از طرح کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد.

روش کار و شاخص‌های مورد بررسی

در اواخر بهمن ماه سال ۱۴۰۱ تعداد ۳۸۴ اصله نهال گلدانی دو ساله بنه از بهترین و همسان‌ترین نهال‌ها از نهالستان منابع طبیعی شهر خرم آباد تهیه شد. نهال‌ها قبل از آغاز رویش و شکفتن جوانه‌ها به گلخانه منتقل و در گلدان‌های پلاستیکی به قطر دهانه ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با کاشت شد، برای شبیه‌سازی خاک گلدان با خاک نهالستان جنگلی، از خاک با ترکیب لومی شنی رسی و به نسبت برابر ماسه و خاک و دو گرم کود دامی پوسیده، برای تمام گلدان‌ها استفاده شد و برای یکنواخت‌سازی تیمارها، وزن تمامی گلدان‌ها در ابتدای آزمایش بر روی چهار کیلوگرم تثبیت شد. تیمارهای خشکی در سه سطح شامل: ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار گرد و غبار در چهار سطح شامل: صفر، ۳۵۰، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم در مترمکعب بود (Yaghmaei et al., 2022). در این آزمایش در مجموع ۱۲ ترکیب تیماری شامل سه سطح تنش خشکی و چهار سطح گرد و غبار اعمال شد. هر تیمار در چهار تکرار اجرا شد و در هر تکرار هشت اصله نهال مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین هر تیمار شامل ۳۲ نهال بوده و در مجموع ۳۸۴ اصله نهال در کل آزمایش به کار گرفته شد. نمونه‌های خاک برای اعمال تیمار گرد و غبار از یکی از هفت

کانون اصلی تولید گرد و غبار در استان خوزستان واقع در نواحی خشک و بیابانی غربی استان خوزستان (تالاب هورالعظیم) که از نظر ژئومورفولوژیکی مستعد فرسایش بادی هستند، استفاده شد (Yaghmaei et al., 2022). نمونه‌های خاک پس از کوبیدن و خشک شدن در هوای آزاد، برای یکنواخت‌سازی اندازه ذرات و حذف ذرات درشت، به صورت مرحله‌ای از مجموعه الک‌ها با مش‌های ۳۵، ۶۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ عبور داده شدند؛ به طوری که ابتدا خاک از الک مش ۳۵ عبور داده شد و سپس بخش عبوری به ترتیب از الک‌های مش ۶۰، ۲۰۰ و در نهایت مش ۴۰۰ الک شد. در مرحله نهایی، ذرات عبوری از الک مش ۴۰۰، معادل ذرات با قطر ۳۸ میکرون، جمع‌آوری شده و برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. سپس سه اتاقک رشد با پوشش پلاستیکی در ابعاد $1/8 \times 2/5 \times 6$ متر برای اعمال گرد و غبار به مقدار ۳۵۰، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم در مترمکعب، طراحی و ساخته شد. جنس پلاستیک‌ها پلی‌اتیلن بود. آلودگی گرد و غبار در سطوح ذکر شده با استفاده از دستگاه دمنده هر ۱۰ روز، یک مرتبه به مدت زمانی یک ساعت و نیم و به طور کلی ۲۰ مرتبه در طول کل آزمایش بر روی نهال‌ها اعمال شد و اندازه‌گیری غلظت آن در هریک از محفظه‌ها با دستگاه غبارسنج با نام Dust TrackMODEL 8520 اندازه‌گیری و کنترل شد (شکل ۱). همزمان با تیمار گرد و غبار، تنش خشکی به روش وزنی، روی نهال‌ها اعمال شد. در خارج از اتاقک گرد و غبار، تعداد ۹۶ نهال گذاشته شد که فقط تیمارهای خشکی روی آنها اعمال شد و عاری از گرد و غبار بودند.



شکل ۱- فرآیند آماده سازی گردوغبار، الک کردن خاک، اعمال گرد و غبار بر روی نهال‌های داخل اتاقک و اندازه‌گیری مقدار غلظت آن با دستگاه گرد و غبارسنج

Figure 1. Dust preparation process: soil sieving, application of dust to seedlings inside the chamber, and measurement of dust concentration using a dust meter.

شکل ۲ مقایسه ای از رشد نهال در تیمارهای آبیاری شاهد، ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد.

در آذرماه ۱۴۰۲ پس از پایان آزمایش، از هر تیمار تعداد ۱۰ نهال به صورت تصادفی برای اندازه‌گیری آنزیم‌ها، انتخاب شد و پس از خشک شدن با ازت مایع به آزمایشگاه و فریزر ۱۸- انتقال و پس از یک هفته آزمایش‌ها انجام شد.



شکل ۲- مقایسه رشد نهال در آبیاری شاهد، ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی (به ترتیب الف، ب و ج) در غلظت گرد و غبار ۳۵۰ میکروگرم در مترمکعب

Figure 2. Comparison of seedling growth under irrigation at control, 75%, and 50% field capacity (labeled a, b, and c, respectively) at a dust concentration of 350 micrograms per cubic meter.

سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش (Aebi 1984) و آنزیم پراکسیداز براساس روش (Chance and Maehly 1955) اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز بر پایه روش (Nakano and Asada 1981) با اصلاحاتی انجام شد. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با کمک روش (Misra 1972) اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری

برای تجزیه و تحلیل آماری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و سپس از طریق آنالیز واریانس دوطرفه و مدل آزمایش اسپلیت پلات داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای مقایسه چندگانه نیز از آزمون دانکن در محیط نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد. در این آزمایش، تنش خشکی به عنوان عامل اصلی و گرد و غبار به عنوان عامل فرعی انتخاب شد و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار EXCEL 2021 انجام شد.

نتایج

نتایج نشان داد که تأثیر تنش‌های خشکی و گردوغبار بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، سوپر اکسید

دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بود. با این حال، اثرهای متقابل این دو تنش تنها برای آنزیم آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار نبود، که بیانگر این است هر تنش به صورت مستقل بر فعالیت این آنزیم تأثیر گذاشته است. آنزیم کاتالاز با افزایش تنش‌ها روند افزایشی داشت. در شرایط تنش خشکی با سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در پاسخ به افزایش غلظت گرد و غبار ابتدا کاهش مختصری را در غلظت ۳۵۰ میکروگرم بر مترمکعب نشان داد. با افزایش بیشتر غلظت گرد و غبار به سطوح ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب، فعالیت SOD به طور قابل توجهی افزایش یافت.

هرچند فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت تأثیر تنش‌های خشکی و گرد و غبار در سطح آماری معنی‌دار قرار گرفت، اما روند تغییرات آن در پاسخ به افزایش شدت تنش، الگوی مشخص افزایشی یا کاهش‌ی نداشت. یافته‌های ما نشان می‌دهد که نهال بنه با افزایش فعالیت پراکسیداز روند غیرخطی (افزایشی کاهش‌ی) از خود نشان داد.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و گرد و غبار بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نهال‌های بنه

Table 1. Variance analysis the effect of drought stress and dust on antioxidant Enzyme of the *Pistacia atlantica* Desf.

منبع تغییرات	درجه آزادی	سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز
S.o.V	df	Superoxide dismutase	Peroxidase	Catalase	Ascorbat peroxidas
بلوک	2	0.0266**	0.0003 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.025 ^{ns}
تنش خشکی	2	0.406**	0.160**	0.00015**	0.205**
Drought stress					

*, **, ns: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار.

*, ** and ns: Significant at 5% and 1% levels of probability and non-significant, respectively.

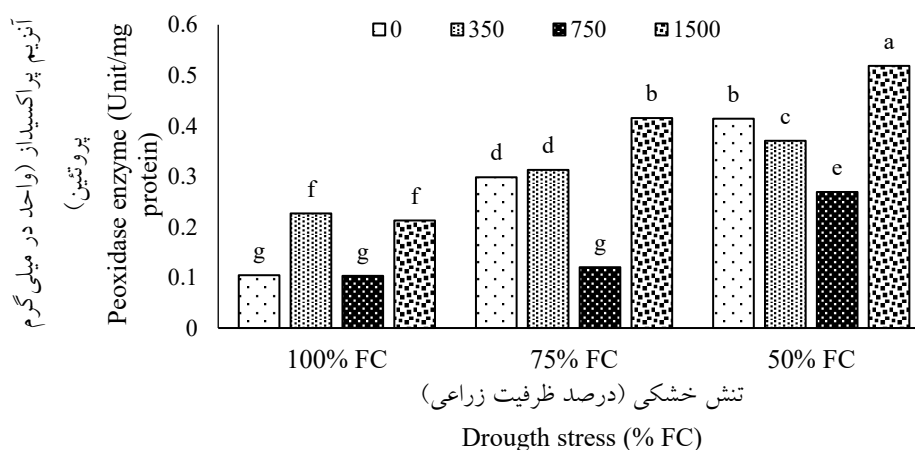
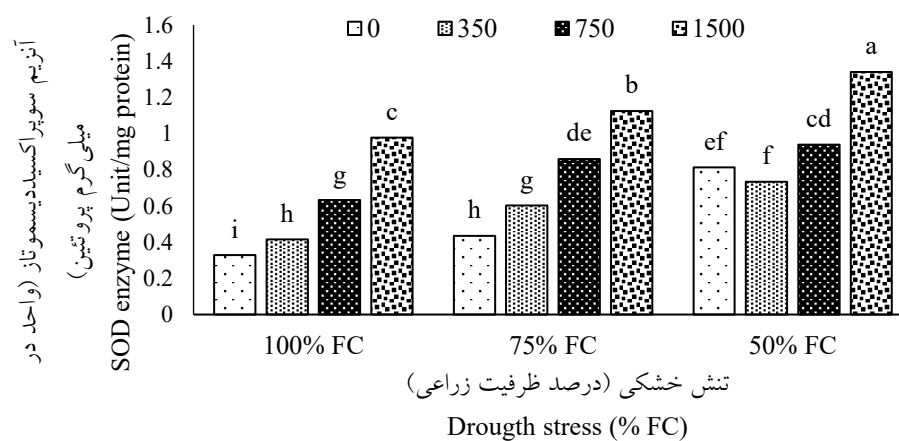
ادامه جدول ۱.

Continued Table 1.

منبع تغییرات S.o.V	درجه آزادی df	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	پراکسیداز Peroxidase	کاتالاز Catalase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbat peroxidase
خطای اصلی Main error	4	0.013	0.0004	0.000001	0.004
گرد و غبار Dust	3	0.717**	0.073**	0.0004**	0.303**
تنش خشکی × گرد و غبار Dust×Drought stress	6	0.013**	0.008**	0.00001*	0.004 ^{ns}
خطای کل Total error	18	0.003	0.0001	0.000006	0.014
ضریب تغییرات C.V.	-	7.387	4.155	9.015	13.136

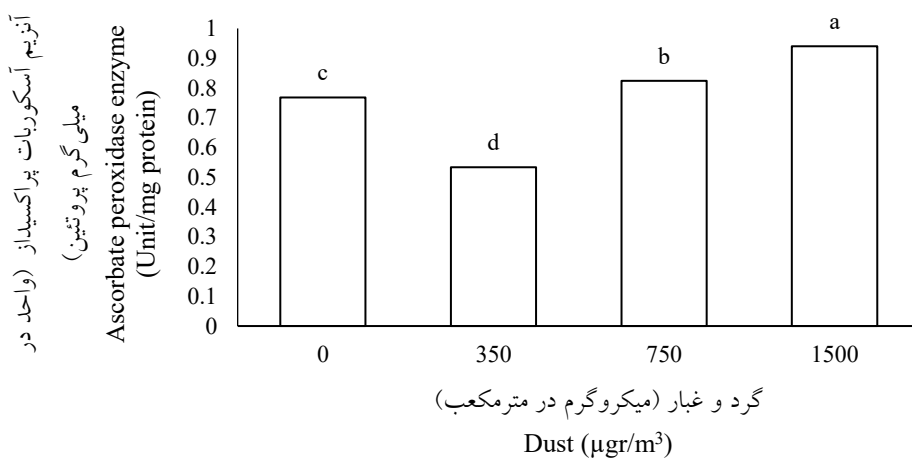
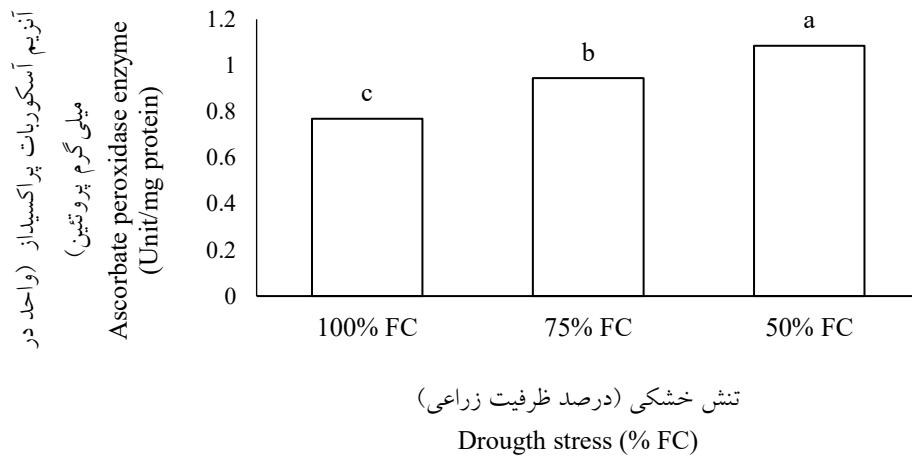
*, ** و ^{ns}: وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد و عدم اختلاف معنی دار.

*, ** and ns: Significant at 5% and 1% levels of probability and non-significant, respectively.



شکل ۳- تاثیر تنش خشکی و گرد و غبار بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز

Figure 3. Effect of drought and dust stress on the activity of antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) and ascorbat peroxidase (APX)



ادامه شکل ۳.

Continued Figure 3.

بحث

(Amini et al., 2014) (*europaea*) و اکالپتوس (Hashempour et al., 2011) همخوانی دارد. این افزایش فعالیت آنزیم‌ها بیانگر پاسخ قوی سیستم دفاعی گیاه به فشار اکسیداتیو ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش همزمان است. با این حال، در غلظت پایین گرد و غبار (۳۵۰ میکروگرم بر مترمکعب) و در شرایط خشکی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاهش موقتی و معنی‌داری در فعالیت برخی آنزیم‌ها، به‌ویژه SOD و آسکوربات پراکسیداز (APX)، مشاهده شد. این پدیده که در بررسی‌های قبلی نیز گزارش شده است (Kozłowski, 2011)، می‌تواند ناشی از آسیب موقت به سیستم آنتی‌اکسیدانی یا مهار عملکرد آنزیم‌ها

گیاهان برای مقابله با تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات را افزایش می‌دهند تا سطح رادیکال‌های آزاد اکسیژن را کاهش داده و از آسیب اکسیداتیو جلوگیری کنند (Mittler et al., 2004).

در این بررسی مشاهده شد که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در نهال‌های بنه تحت تنش ترکیبی خشکی و گرد و غبار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که با پژوهش‌های انجام‌شده در مورد ارغوان (*Cercis siliquastrum* L) (Saeidi Abueshaghi et al, 2021) و زیتون (*Olea*)

(2017) بود. اما عدم وجود اثر متقابل معنی‌دار بین این دو تنش بر فعالیت APX در این پژوهش، نشان‌دهنده پیچیدگی و تنظیم متقابل مسیرهای آنتی‌اکسیدانی در شرایط استرس ترکیبی است که ممکن است سبب مهار یا تعدیل فعالیت برخی آنزیم‌ها شود (Suzuki et al., 2015; Pandey et al., 2014).

برخی پژوهشگران تأیید کرده‌اند که فعالسازی سیستم آنتی‌اکسیدانی در بنه، به‌ویژه پراکسیداز، به افزایش مقاومت این گونه در برابر خشکی و آلودگی‌های گرد و غبار کمک می‌کند (Moradi, 2018; Ghorbani &).

پژوهش (Mahajan and Tuteja, 2005) نیز تأکید کردند که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی یک واکنش حفاظتی حیاتی برای حفظ هومئوستازی سلولی در گیاهان تحت تنش‌های چندگانه است. اما باید توجه داشت که پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند بسته به شدت، مدت زمان تنش و گونه گیاهی متفاوت باشد. برای مثال، بررسی (Kazemi et al., 2017) در نهال‌های درختی تحت تنش گردوغبار شدید نشان داد که افزایش بیش از حد ROS منجر به آسیب ساختاری آنزیم‌ها و کاهش فعالیت SOD شده است. بنابراین، پاسخ سیستم آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش‌های چندگانه پیچیده و متغیر است. همچنین، یافته‌های این بررسی با نتایج گزارش شده در دیگر گونه‌های درختی مقاوم به خشکی مانند افاقیا (*Acacia nilotica*) (Mokhtar et al., 2014)، کاج حلب (*Pinus halepensis*) (Pérez-López et al., 2009) و بلوط همیشه‌سبز (*Quercus ilex*) (Morales et al., 2015) هم‌راستا است که در آنها نیز افزایش فعالیت SOD به‌عنوان مکانیزم سازگاری گیاه با تنش خشکی گزارش شده است. البته گزارش‌هایی از واکنش‌های متفاوت نیز وجود دارد، به‌عنوان مثال، در نهال‌های صنوبر (*Populus deltoides*) فعالیت SOD

به دلیل فشار استرس اکسیداتیو بالا در مراحل اولیه مواجهه با گرد و غبار باشد و یا به دلیل استرس شدید خشکی که توان گیاه را برای تولید این آنزیم‌ها کاهش می‌دهد و انرژی را برای بقای خودش نگه دارد (Harb et al., 2015).

با افزایش بیشتر غلظت گرد و غبار (۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر مترمکعب)، پاسخ جبرانی گیاه فعال شده و فعالیت آنزیم‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافت که نشان‌دهنده تقویت مکانیسم‌های دفاعی و بهبود ظرفیت حذف رادیکال‌های آزاد است (Gill and Tuteja, 2010; Zhang et al., 2018). تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش ترکیبی، سبب آسیب به مولکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها و DNA می‌شود که گیاه با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند SOD تلاش می‌کند از این آسیب‌ها جلوگیری و آنها را کاهش دهد. پژوهش‌هایی مشابه در نهال‌های گونه‌های *Eucalyptus camaldulensis* و *Bombax ceiba* (Sharma et al., 2019) تحت شرایط شبیه‌سازی گرد و غبار نیز افزایش معنی‌دار فعالیت SOD، CAT و POD را به‌عنوان پاسخ به استرس گرد و غبار نشان دادند که این الگو با یافته‌های ما در بنه مطابقت دارد (Gill & Tuteja, 2010).

از طرف دیگر، برخی بررسی‌ها نیز واکنش‌های متفاوت یا حتی کاهش فعالیت آنزیم‌ها را تحت شرایط خاص گزارش داده‌اند؛ به‌طور مثال Li et al., (2012) در نهال‌های *Populus deltoides* کاهش فعالیت SOD را در تنش خشکی شدید مشاهده کردند که نشان‌دهنده حساسیت گونه‌ها و تأثیر شدت و مدت زمان استرس بر پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی است.

در رابطه با اسکوربات پراکسیداز، افزایش فعالیت این آنزیم تحت تنش‌های جداگانه خشکی و گرد و غبار همسو با پژوهش‌های (Mittler, 2002) و Khan et al.

حاکی از آن است که این گونه با فعالسازی سیستم آنتی‌اکسیدانی خود، به‌ویژه آنزیم پراکسیداز، تا حدودی مقاومت خود را در برابر شرایط استرس‌زا مانند خشکی و آلودگی افزایش می‌دهد (Moradi & Ghorbani, 2018).

در زمینه آنزیم اسکوربات پراکسیداز نیز، تأثیر تنش خشکی و گرد و غبار به‌صورت جداگانه موجب افزایش فعالیت این آنزیم شده است که با یافته‌های پیشین همسو است. بررسی‌های متعددی نشان داده‌اند که تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند اسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز می‌شود تا گیاه بتواند با استرس اکسیداتیو مقابله کند (Mittler, 2002; Gill & Tuteja, 2010). همچنین گرد و غبار به‌عنوان یک عامل استرس محیطی با ایجاد اختلال در روند فتوسنتز و تولید رادیکال‌های آزاد، موجب تحریک پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Khan et al., 2017). با این حال، در این پژوهش تأثیر همزمان تنش خشکی و گرد و غبار بر فعالیت اسکوربات پراکسیداز معنی‌دار نبود. این موضوع نشان‌دهنده تعامل پیچیده و غیرخطی بین مسیرهای آنتی‌اکسیدانی است که ممکن است منجر به مهار یا تعدیل فعالیت برخی آنزیم‌ها در شرایط تنش ترکیبی شود (Suzuki et al., 2014; Pandey et al., 2015). بنابراین، عدم وجود اثر معنی‌دار بر فعالیت اسکوربات پراکسیداز در شرایط تنش ترکیبی ممکن است ناشی از سازوکارهای همپوشانی و تنظیم متقابل مسیرهای دفاعی گیاه باشد که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. در مجموع، یافته‌های این بررسی نشان می‌دهد که نهال بنه به‌عنوان گونه‌ای بومی و مقاوم به خشکی، با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی خود به‌ویژه از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های CAT، SOD و POD، پاسخ حفاظتی

تحت تنش خشکی شدید کاهش یافته است (Li et al., 2012) و در زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior*) تغییر معنی‌داری در فعالیت آن مشاهده نشده است (Fernández-Marín et al., 2013). این تفاوت‌ها به تفاوت‌های گونه‌ای، شدت و مدت زمان تنش و مرحله رشدی گیاهان مرتبط است. در نتیجه، نهال بنه به‌عنوان گونه‌ای بومی مقاوم به خشکی، با افزایش فعالیت SOD توانسته است پاسخ مؤثری به تنش‌های اکسیداتیو نشان دهد.

یافته‌های ما نیز این موضوع را تأیید می‌کند که نهال بنه با افزایش فعالیت پراکسیداز روند غیرخطی از خود نشان داد، به این معنا که افزایش شدت تنش الزاماً منجر به افزایش یا کاهش یکنواخت فعالیت آنزیم نشد. همچنین نشان‌دهنده تنظیم پیچیده و مرحله‌ای مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است و نهال سعی در کاهش اثرهای مخرب ناشی از تجمع گرد و غبار و خشکی دارد و می‌تواند نشانگر تلاش گیاه برای حفظ تعادل بین تولید و خنثی‌سازی ROS در شرایط تنش ترکیبی باشد. افزایش فعالیت پراکسیداز منجر به حذف یا کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود که در شرایط استرس‌زا افزایش می‌یابند و می‌توانند سبب آسیب سلولی و اختلال در عملکرد فیزیولوژیکی گیاه شوند (Singh & Kumar, 2017). این یافته‌ها تأکید می‌کنند که پراکسیداز نقش کلیدی در سیستم دفاعی گیاهان در برابر استرس‌های محیطی ایفا می‌کند. پژوهش‌های متعدد در گونه‌های درختی مانند بلوط (*Quercus brantii*) نشان داده است که افزایش فعالیت پراکسیداز یکی از مکانیزم‌های مهم مقابله با استرس اکسیداتیو ناشی از خشکی و آلودگی‌های گرد و غباری است و به حفظ سلامت سلولی کمک می‌کند (Ahmadi et al., 2019). بررسی‌های مشابه روی بنه نیز

استرس را مواجه هستند. با توجه به نقش مهم ریزگردها در فعالیت‌های فیزیولوژیکی بنه و لزوم کاهش اثرهای آن توصیه می‌شود احیای تالاب‌ها از طریق تأمین حق‌آبه و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، مانند کاشت گونه‌های گیاهی مقاوم در بسترهای خشک تالاب‌ها، انجام شود. علاوه بر این، همکاری‌های منطقه‌ای با کشورهای همسایه برای مهار کانون‌های تولید گرد و غبار و مدیریت بهینه منابع آب نیز ضروری است. اجرای این اقدامات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار ریزگردها و بهبود کیفیت هوا در مناطق آسیب‌دیده ایفا کند.

References

- Aebi, H. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology* **1984**, 105, 121–126.
- Ahmadi, M.; Ranjbar, G.; Etemadi, N. Antioxidant responses of *Quercus* seedlings under combined drought and dust stress. *Journal of Forestry Research* **2020**, 31(4), 1321–1330.
- Ahmadi, S.; Khan, M. A.; Iqbal, M. Response of *Quercus* species to drought stress: Antioxidant enzymes and physiological changes. *Journal of Plant Physiology* **2019**, 234, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.02.004>.
- Amini, Z.; Moalemi, N.; Saadati, S. Effect of Water Deficit on Proline Content and Activity of Antioxidant Enzymes among Three Olive (*Olea europaea* L.) Cultivars. *Journal of Plant Research* **2014**, 27 (2), 156–167. (In Persian)
- Chance, B.; Maehly, A. C. Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology* **1955**, 2, 764–775.
- Esmaili, A.; Mousavi Mirkala, S. R.; Alijanpour, A.; Hajarian, M.; Ghanbari, S. The effect of altitude on quantitative and qualitative characteristics and estimation of *Pistacia* IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*; Cambridge University Press: Cambridge, **2021**.
- Iranmanesh, Y.; Jahanbazy, H.; Talebi, M.; Mahinpour, H. Effect of morphological

مؤثری به تنش‌های ترکیبی خشکی و گردوغبار ارائه می‌دهد. این پاسخ‌ها می‌توانند نقش مهمی در حفظ سلامت سلولی و بقای گیاهان در بوم‌سازگان‌های نیمه‌خشک ایفا کنند. با توجه به خشک شدن تعدادی از نهال‌ها در بیشترین تنش خشکی و گرد و غبار می‌توان گفت در تنش‌های بالای رطوبتی و ریزگرد عملکردهای فیزیولوژیکی گیاه به‌نحوی تحت تاثیر قرار می‌گیرد که سبب کاهش رشد نهال شده و شرایط برای خشک شدن نهال فراهم می‌شود.

در نهایت، این یافته‌ها اهمیت درک پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان به تنش‌های چندگانه محیطی را برجسته می‌سازد، به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی که گیاهان به‌صورت همزمان با چندین عامل

- atlantica* fruits in the forest stands in Sardasht, West Azerbaijan Province. *Journal of Forest Research and Development* **2022**, 7(4), 653–670. (In Persian).
- Fernández-Marín, B.; Casas, R.; Ancín, A. Antioxidant enzyme activity in *Fraxinus excelsior* under drought conditions. *Plant Biology* **2013**, 15(5), 819–826. <https://doi.org/10.1111/plb.12032>.
- Gill, S. S.; Tuteja, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* **2010**, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Harb, A.; Samarah, N. Gene expression and activity of antioxidant enzymes in barley (*Hordeum vulgare* L.) under controlled severe drought. *Journal of Agronomy and Crop Science* **2015**.
- Hashempour, F.; Rostami Shahraji, T.; Assareh, M. H.; Shariat, A. Impact of Drought Stress on Some Physiological Traits in Five Eucalypt Species. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2011**, 19 (2), 222–233. (In Persian)
- variables, altitude and tree gender on gum production of *Pistacia atlantica* in Chaharmahal & Bakhtiari Province forests. *Journal of Forest Research and Development* **2019**, 5(2), 195–207. (In Persian).

- Jafaryan, E.; Pilehvar, B.; Tavakli, M. Physiological responses of mature Persian oak (*Quercus brantii* L.) under natural conditions to drought stress. *Forest Research and Development* **2024**, 10(2), 167–181. (In Persian).
- Karimi, N.; Hassani, A.; Mohammadi, H. Drought tolerance mechanisms in *Pistacia atlantica* seedlings. *Journal of Arid Environments* **2019**, 164, 58–66.
- Kazemi, H.; Ahmadi, F.; Nasrollahi, S. Effect of dust stress on antioxidant enzyme activities in tree seedlings under drought conditions. *Iranian Journal of Plant Physiology* **2017**, 7(4), 1913–1922.
- Khan, M. I. R.; et al. Plant responses to dust pollution: Impact on photosynthesis and antioxidant metabolism. *Environmental Science and Pollution Research* **2017**, 24, 21128–21140.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9749-7>.
- Kozłowski, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology* **2011**, 31(6), 567–574.
- Li, X.; Zhang, J.; Huang, Y. Response of antioxidant enzymes to drought stress in *Populus deltoides* seedlings. *Plant Science* **2012**, 197, 79–86.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.09.004>.
- Mahajan, S.; Tuteja, N. Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **2005**, 444(2), 139–158.
- Middleton, N. Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research* **2017**, 24, 53–63.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>.
- Mirzaei, J.; Karamshahi, A. A. The effect of drought stress on the growth and some physiological characteristics of *Pistacia atlantica* Desf. seedlings. *Wood and Forest Science and Technology Research Journal* **2014**, 22(1). (In Persian).
- Misra, H. P.; Fridovich, I. The generation of superoxide radical during auto oxidation. *Journal of Biological Chemistry* **1972**, 247, 6960–6966.
- Mittler, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* **2002**, 7(9), 405–410.
- Mittler, R.; Vanderauwera, S.; Gollery, M.; Van Breusegem, F. Reactive Oxygen Gene Network of Plants. *Trends in Plant Science* **2004**, 9 (10), 490–498.
- Mokhtar, M.; El-Kholy, A.; El-Bebany, A. Effect of drought stress on antioxidant enzymes in *Acacia nilotica* seedlings. *Environmental and Experimental Botany* **2014**, 102, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.005>.
- Moradi, F.; Ghorbani, R. Antioxidant enzyme activities in *Pistacia atlantica* under drought and pollution stress. *Iranian Journal of Forestry and Range Management* **2018**, 72(1), 45–56. (In Persian).
- Morales, D.; García-Criado, B.; Retana, J. Antioxidant response in *Quercus ilex* seedlings under drought stress. *Environmental and Experimental Botany* **2015**, 111, 119–127.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.09.009>.
- Naji, H. R.; Roushani Niaa, F.; Tongo, A.; Soheili, F.; Arminian, A. Effect of simulated dust storm conditions on the physiological features of wild pistachio. *Forests* **2024**, 20(1), 16–24.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2280647>.
- Nakano, Y.; Asada, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology* **1981**, 22(5), 867–880.
- Nawaz, M. F.; Rashid, M. H. U.; Saeed-Ur-Rehman, M.; Gul, S.; Farooq, T. H.; Sabir, M. A.; Iftikhar, J.; Abdelsalam, N. R.; Dessoky, E. S.; Alotaibi, S. S. Effect of dust types on the eco-physiological response of three tree species seedlings: *Eucalyptus camaldulensis*, *Conocarpus erectus* and *Bombax ceiba*. *Atmosphere* **2022**, 13(7), 1010, 1–12.
<https://doi.org/10.3390/atmos13071010>.
- Pandey, P.; et al. Impact of combined abiotic stresses on oxidative damage and antioxidant defense in plants. **2015**.
- Pérez-López, U.; Gómez-Cadenas, A.; Muñoz-Rueda, A. Drought-induced changes in antioxidant enzymes in *Pinus halepensis* seedlings. *Tree Physiology* **2009**, 29(9), 1173–1181.
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpp059>.
- Saeidi Abueshaghi, Z.; Pilehvar, B.; Sayedena, S. V. Effect of drought stress on morphophysiological and biochemical traits of *Cercis siliquastrum* L. seedlings. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2021**, 29(1), 91–100.

- <https://doi.org/10.22059/jfrd.2021.121376>.
(In Persian).
- Shahrokhi, S.; Tavakoli, E.; Moradi, F. Oxidative stress and antioxidant enzyme activity in plants exposed to particulate matter pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2018**, 157, 228–235.
- Shahsavani, A.; et al. The evaluation of PM10, PM2.5, and PM1 concentrations during Middle Eastern dust storms in Ahvaz, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* **2020**, 192, 206. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8155-9>.
- Sharma, P.; Dubey, R. S.; Chauhan, P. S. Impact of combined drought and dust stress on antioxidant enzymes in *Eucalyptus* seedlings. *Environmental Science and Pollution Research* **2019**, 26(21), 21800–21812.
- Singh, R.; Kumar, P. Role of peroxidase and catalase enzymes in oxidative stress tolerance of plants. *Plant Biology Journal* **2017**, 19(3), 265–273. <https://doi.org/10.1111/plb.12543>.
- Suzuki, N.; Rivero, R. M.; Shulaev, V.; Blumwald, E.; Mittler, R. Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist* **2014**, 203(1), 32–43. <https://doi.org/10.1111/nph.12797>.
- Wali, A.; Khamishi, S.; Mousavi, S. H.; Panahi, F.; Temski, A. Climatic analysis and tracking of dust plumes in the south and center of Iran. *Journal of Environmental Science* **2014**, 40, 961–972. (In Persian).
- Xiong, S.; Wang, Y.; Chen, Y.; Gao, M.; Zhao, Y.; Wu, L. Effects of drought stress and rehydration on physiological and biochemical characteristics of four oak species in China. *Plants* **2022**, 11, 679. <https://doi.org/10.3390/plants11050679>.
- Yaghmaei, L.; Jafari, R.; Soltani, S.; Eshghizadeh, H. R.; Jahanbazy, H. Interaction effects of dust and water deficit stresses on growth and physiology of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Journal of Sustainable Forestry* **2022**, 41(2), 134–158.
- Yousefvand, P.; Pilehvar, B.; Nasrolahi, A. H. Morphological, physiological, and biochemical responses of *Pistacia atlantica* seedlings to elevated CO₂ concentration and drought stress. *European Journal of Forest Research* **2023**. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01548-x>.
- Zhang, L.; Wang, H.; Liu, Y. Combined effects of drought and air pollution on antioxidant enzymes in tree seedlings. *Environmental Pollution* **2018**, 242, 874–882.
- Zoljoodi, M.; Didevarasl, A. Dust events in the western parts of Iran and the relationship with drought expansion over the dust-source areas in Iraq and Syria. *Atmospheric and Climate Sciences* **2013**, 3, 321–336. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.33034>

