



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال دوازدهم / شماره دوم / ۱۴۰۴ (۱ - ۱۶)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2025.9375



تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر بهبود جوانه‌زنی بذر باقلا (*Vicia faba* L.) تحت تنش خشکی

علی عبادی^{۱*} و فاطمه احمدنیا^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۳

چکیده

تنش خشکی یکی از مهمترین عوامل محدودکننده تولیدات کشاورزی است. برای بررسی اثر پرایمینگ با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) بر جوانه‌زنی بذر باقلا (*Vicia faba* L.) تحت تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در زمستان سال ۱۴۰۳ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل پرایمینگ بذر با نانوذرات TiO_2 (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و تنش خشکی (صفر، ۰/۲، ۰/۵- و ۰/۷- بار) بود. سنتز نانوذرات TiO_2 به روش سل‌ژل انجام شد. برای شناسایی پیوندها و ساختار نانوذرات از تجزیه شیمیایی XRD، FTIR و SEM استفاده شد. درصد جوانه‌زنی بذر و ویژگی‌های وابسته به آن مانند شاخص‌های طولی و وزنی گیاهچه، فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین اندازه‌گیری شدند. پتانسیل اسمزی ۰/۷- بار سبب کاهش ۷۶ درصدی جوانه‌زنی بذر باقلا در مقایسه با شاهد شد. غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات TiO_2 مقادیر مشخصه‌های درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن تر و خشک گیاهچه، محتوی پرولین، پراکسیداسیون لیپیدی و فعالیت آنزیم کاتالاز را در تمام سطوح تنش بهبود بخشیدند. افزایش غلظت نانوذرات TiO_2 به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب هم‌افزایی در شرایط تنش شد و افزایش مضاعف فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و کاهش درصد جوانه‌زنی و ویژگی‌های وابسته به آن را در مقایسه با عدم پرایمینگ بذر در پی داشت. اثرات مثبت و منفی نانوذرات TiO_2 در کاهش شدت تنش خشکی و درصد جوانه‌زنی بذر باقلا و رشد گیاهچه آن به غلظت‌های مورد استفاده وابسته بود.

واژه‌های کلیدی: پراش پرتو ایکس (XRD)، پراکسیداسیون لیپیدی، پرایمینگ، پرولین، نانوذرات

۱- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. Ebadi@uma.ac.ir

۲- محقق پسادکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

f.ahmadnia@uma.ac.ir

*نویسنده مسئول: Ebadi@uma.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر نانو تکنولوژی در کشاورزی به دلیل مصرف هدفمند و مؤثر، اهمیت و جایگاه ویژه‌ای یافته است. کاربردهای نانو تکنولوژی در کشاورزی اغلب در سه رویکرد نانوکودها، نانوعلفکش‌ها و نانوأفت‌کش‌ها شناخته می‌شود؛ که نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری قادر به انتقال هدفمند عناصر غذایی و ترکیبات زیست‌فعال هستند (Khalifa et al., 2024). پرایمینگ بذر با نانوذرات یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش جوانه‌زنی و بهبود استقرار گیاهان در شرایط آزمایشگاه است (Ahmadnia and Ebadi, 2024). نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) یکی از نانوذرات پرکاربرد در علوم و صنایع مختلف است (Noman et al., 2019; Sant'as-Miguela et al., 2021; Sharif et al., 2023). نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، نانوذراتی نیمه‌رسانا هستند که در سه نوع ساختاری برکیت^۶، آناتاز^۷ و روتیل^۸ در طبیعت یافت می‌شوند (Sant'as-Miguela et al., 2023). پژوهشگران اظهار داشتند که اثرات مثبت و منفی نانوذرات بر رشد و توسعه گیاه وابسته به ترکیب، غلظت، اندازه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات و همچنین نوع گونه گیاهی است (Ma et al., 2010, Ahmadnia et al., 2025). براساس مطالعه‌ای اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه ماش در غلظت‌های مختلف سبب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند پراکسیداز، کاتالاز، نیترا ردوکتاز و محتوی پروتئین و افزایش عملکرد شده است (Mathew et al., 2021). گزارش شده است که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب تقویت جوانه‌زنی و رشد گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) شده است (Zheng et al., 2005). همچنین پژوهشگران گزارش کرده‌اند که استفاده از غلظت‌های مناسب نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب افزایش جوانه‌زنی بذر، رشد و زودرسی گیاهان دارویی و معطر نسبت به تیمارهای دیگر شده است (Amooaghaie et al., 2021). استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و رشد

باقلا (*Vicia faba L.*) محصولی با ارزش غذایی بالا از خانواده بقولات (*Fabaceae*) است که در بسیاری از اکوسیستم‌های کشاورزی رشد می‌کند. این گیاه به دلیل محتوی بالای مواد آلی مانند پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، تیامین، اسید فولیک، توکوفرول و مواد معدنی مانند آهن و روی به طور گسترده در بسیاری از کشورها برای خوراک انسان و دام استفاده می‌شود (Etemadi et al., 2018; Maalouf et al., 2022a; Maalouf et al., 2022b). عملکرد باقلا به شدت تحت تأثیر چالش‌های محیطی، از جمله تنش خشکی است (Abdel Latef et al., 2021). کمبود آب بر رشد و نمو این گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (Martinez et al., 2007). تنش خشکی سبب ایجاد اختلالات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی متعددی در گیاه باقلا می‌شود (Abid et al., 2017; Siddiqui et al., 2015). اوجی و همکاران (Ouji et al., 2017) بیان کرده‌اند که تنش خشکی بر توسعه، رشد و اجزای عملکرد باقلا تأثیرگذار است و منجر به کاهش قابل توجه عملکرد آن می‌شود. در بسیاری از مطالعات اثر تنش خشکی بر ایجاد اختلال در مسیرهای آنزیمی مختلف، عملکرد فتوسنتزی گیاه، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به بافت‌ها و ماکرومولکول‌ها از جمله DNA، لیپیدها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها گزارش شده است (Kabbadj et al., 2017; Gill and Tuteja, 2010; Reddy et al., 2004). گیاهان سازوکارهای بسیاری از جمله سامانه دفاع آنتی‌اکسیدان و تنظیم اسمزی را برای افزایش پتانسیل بقاء و رشد در طول دوره‌های تنش خشکی در کوتاه‌مدت و بلندمدت اجرا می‌کنند (Yin et al., 2005). برای مثال آنزیم‌های آنتی-اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز^۱، گلوکاتایون رداکتاز^۲، آسکوربات پراکسیداز^۳، دهیدروآسکوربات رداکتاز^۴ و مونودهیدرو آسکوربات رداکتاز^۵ نقش مهمی در از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن در تنش خشکی دارند (Gill and Tuteja, 2010).

⁵Monodehydroascorbate reductase (MDHAR)⁶Brookite⁷Anatase⁸Rutile¹Superoxide dismutase (SOD)²Glutathione reductase (GR)³Ascorbate peroxidase (APX)⁴Dehydroascorbate reductase (DHAR)

بالتر تنش خشکی می‌توانند بر قدرت بقاء بذر و کاهش قابل توجه شاخص‌های وزنی و طولی گیاهچه باقلا ناشی از تنش مؤثر باشند. در این آزمایش، علاوه بر تعیین آستانه تحمل بذر باقلا در برابر تنش خشکی، تعیین غلظت مناسب پرایمینگ نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز از اهداف آزمایشی بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در زمستان سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. نوع طرح آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای آزمایشی شامل پرایمینگ بذر باقلا (*Vicia faba* L.) با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در چهار سطح (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و تنش خشکی با پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ در چهار سطح (صفر، ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۷- بار) بود. اعمال تنش خشکی براساس معادله میشل و کافمن^۱ (۱۹۷۳) انجام شد (رابطه ۱).

$$\Psi_s = -(1.18 \times 10^{-2})C - (1.18 \times 10^{-4})C^2 + (2.67 \times 10^{-4})CT + (8.39 \times 10^{-7})C^2T$$

سنتز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با استفاده از روش سل ژل انجام شد (Pazhouhan *et al.*, 2016). همچنین شناسایی نوع پیوندها و ترکیبات شیمیایی موجود در نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده توسط طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR, Perkin Elmer) و تصویربرداری از شکل ساختاری نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Spectrum RX I) و ساختار کریستالی نانوذرات توسط پراش اشعه ایکس (XRD, Philips Xpert) (diffractometer) تجزیه شدند.

غلظت‌های مختلف نانوذرات مورد بررسی پس از توزین به وسیله ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم مدل Satorius (SECURA124-1A, Germany) در حجم مشخص از آب مقطر (یک لیتر) تحت تأثیر امواج تراسوند با استفاده از دستگاه تراسونیک مدل Bandelin DT 255 H به مدت ۱۵ دقیقه همگن شدند. بذر باقلا، رقم

گیاهچه گیاهان دارویی را افزایش می‌دهد (Hatami *et al.*, 2014). براساس مطالعات پیشین، پذیرفته شده است که نانوذرات می‌توانند در اثر نفوذ به بذر و افزایش جذب آب و مواد معدنی سبب بهبود جوانه‌زنی بذر شوند (Cox *et al.*, 2016). پژوهشگران گزارش کرده‌اند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های پایین سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی پیاز (*Allium cepa*) شدند؛ به طوری که آنزیم‌های کلیدی هیدرولیزکننده‌ای از جمله آمیلاز و پروتئاز در جوانه پیاز افزایش یافته است (Marambe and Ando, 1992). همچنین گزارش شده است که همبستگی مثبتی بین جذب آب و فعالیت آلفا-آمیلاز برای تجزیه نشاسته و افزایش قند در بذر سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench) وجود داشته و نانوذرات توانسته‌اند به صورت آهسته به درون بذر نفوذ کرده و سازوکار جوانه‌زنی را تحت تأثیر قرار دهند (Navarro *et al.*, 2018). علاوه بر این، اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان محافظت از بذرها، افزایش رشد و جوانه‌زنی گیاهان، کنترل بیماری‌های گیاهی، تخریب آفت‌کش‌ها و شناسایی بقایای آن‌ها نیز گزارش شده است (Aragay *et al.*, 2012; Servin *et al.*, 2015). همچنین این نانوذرات سبب افزایش رشد ریشه و اندام هوایی، عملکرد دانه، بهبود سلامت گیاه از طریق افزایش محتوی کلروفیل، پروتئین محلول در برگ (Raliya *et al.*, 2015_b)، محتوی کاروتنوئیدها (Raliya *et al.*, 2015_a) و افزایش جذب چندین عنصر ضروری (Tan *et al.*, 2018) می‌شوند. اثر مثبت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی در گندم نیز گزارش شده است (Mustafa *et al.*, 2021). پژوهشگران در بررسی دیگری گزارش کرده‌اند که ارتفاع و زیست‌توده خشک باقلا تحت تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم قرار گرفته است (Alharby *et al.*, 2021).

تنش خشکی می‌تواند اثرات مخربی بر جوانه‌زنی و استقرار اولیه گیاهچه داشته باشد، بنابراین آزمایشی با عنوان تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر بهبود جوانه‌زنی بذر باقلا (*Vicia faba* L.) تحت تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول اجرا شد. فرضیه‌های آزمایشی بر این اساس بود که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شدت‌های

¹Michel and Kaufmann

۲۵ درجه سانتی‌گراد و در تاریکی در ژرمنیاتور (GROUC. GC.400, IRAN) نگهداری شدند. شمارش بذرهای جوانه‌زده به مدت ۱۴ روز در ساعت معین انجام شد (Ghassemi-Golezani and Hosseinzadeh- Mahootchy, 2009). خروج ریشه‌چه سالم به طول دو میلی‌متر، مبنای بذر جوانه‌زده برای شمارش در نظر گرفته شد (Perry, 1991). شاخص‌های طولی و وزنی گیاهچه باقلا در پایان چهاردهمین روز با استفاده از خط‌کش و ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سایر صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذر براساس روابط ارائه شده در جدول (۱) محاسبه شدند.

جدول ۱- آزمون‌های زیست‌سنجی بذر باقلا

Table 1. Bioassay tests of faba bean seed

Traits under investigation	صفات مورد بررسی	معادلات	منابع
Germination percentage	درصد جوانه‌زنی	$GP = \frac{S}{T} \times 100$	Scott <i>et al.</i> , 1984
Germination rate	سرعت جوانه‌زنی	$GS = \sum \frac{n}{t}$	Maguire, 1962
Percentage reduction	درصد کاهش	$PR = \frac{(x-y)}{x} \times 100$	Ahmadnia <i>et al.</i> , 2023

در این روابط GP بیانگر درصد جوانه‌زنی، S بیانگر تعداد بذرهای جوانه‌زده، T بیانگر تعداد کل بذرهای نمونه، GS بیانگر سرعت جوانه‌زنی، n بیانگر تعداد بذر جوانه زده در زمان t، t بیانگر تعداد روزهای پس از شروع جوانه‌زنی، PR بیانگر درصد کاهش صفات مورد بررسی، X بیانگر نتایج به‌دست آمده در تیمار شاهد برای هر کدام از صفات مورد بررسی، Y بیانگر نتایج به‌دست آمده در سایر تیمارها برای هر کدام از صفات مورد بررسی می‌باشد.

پراکسیداسیون لیپیدی: به‌منظور سنجش پراکسیداسیون لیپیدی در حدود ۰/۵ گرم از گیاهچه باقلا در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ درصد تری‌کلرواستیک اسید همگن و به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. دو میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور حاصل با چهار میلی‌لیتر از محلول ۲۰ درصد تری‌کلرواستیک اسید محتوی ۰/۵ درصد تیوباربتوریک اسید مخلوط شد. کمپلکس حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس به حمام آب سرد منتقل شد. نمونه‌ها مجدداً به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. میزان تغییرات جذب پراکسیداسیون لیپیدی در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر مدل UV 2100 ساخت آمریکا قرائت شد (Stewart and Bewley, 1980).

محتوی پرولین: سنجش محتوی پرولین با استفاده از روش بیتز و همکاران (Bates *et al.*, 1973) انجام شد. براساس این روش یک گرم بافت تازه گیاهی در ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک اسید سه درصد ساییده شده و با سرعت

شادان (G-Faba-133) تهیه شده از مرکز تحقیقات استان اردبیل (پارس آباد مغان) پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک دقیقه در محلول‌های نانوپرایمینگ به مدت سه ساعت نگهداری شدند. مدت زمان پرایمینگ بذرها براساس نتایج پیش‌آزمایش اولیه تعیین گردید. سپس بذرهای در دمای محیط 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. برای اعمال تنش خشکی در پتری‌دیش‌های شیشه‌ای بدون کاغذ صافی تعداد ۲۰ عدد بذر سالم قرار گرفت و به‌منظور جلوگیری از هدررفت رطوبت، پتری‌دیش‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی شفاف بسته‌بندی شدند. پتری‌دیش‌ها در دمای

فعالیت آنزیم کاتالاز: به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز ۰/۲ گرم بافت تازه از گیاهچه باقلا در مجاورت نیتروژن مایع پودر شده و با یک میلی‌لیتر بافر تریس-کلریدریک ۰/۵۰ مولار با اسیدیتته ۷/۵ هموزن گردید. همگنای حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول شفاف رویی برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده شد. سپس ۲/۵ میلی‌لیتر بافر تریس (۵۰ میلی‌مولار، اسیدیتته هفت) و ۰/۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه (پنج میلی‌مولار) تهیه شده و ۶۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی در حمام یخ به آن اضافه شد. میزان جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. برای نمونه شاهد از بافر تریس-کلریدریک ۰/۵۰ مولار استفاده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز براساس تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل UV 2100 ساخت آمریکا محاسبه شد (Sudhakar *et al.*, 2001).

آناناز هستند. پیک مشخصه در $27/8^\circ$ به صفحه کریستالی (۱۱۰) فاز روتایل دی‌اکسید تیتانیوم نسبت داده می‌شوند. پیک‌های پراش مطابق با ساختار تتراگونال دی‌اکسید تیتانیوم و ترکیبی از فاز آناناز با شماره مرجع ۰۴-۰۴۷۷-۰۰۴ هستند و فاز روتایل با شماره مرجع ۰۱-۰۸۸-۱۱۷۳ هستند (Khandekar et al., 2021; Wang et al., 2020). عدم مشاهده پیک ناخالصی در الگوهای نانوذرات، نشان‌دهنده صحت سنتز انجام یافته است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل (۱-۲) نشان می‌دهد که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم دارای ساختار کروی هستند.

درصد جوانه‌زنی بذر: نتایج نشان داد که برهمکنش پرایمینگ با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و سطوح مختلف تنش خشکی بر درصد جوانه‌زنی بذر باقلا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تشدید تنش خشکی منجر به کاهش جوانه‌زنی بذر باقلا گردید، با این حال افزایش غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) منجر به بهبود جوانه‌زنی بذر باقلا شد (شکل ۲). پرایمینگ بذر باقلا با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل‌های اسمزی ناشی از پلی اتیلن گلیکول اثر منفی و کاهش بر درصد جوانه‌زنی بذر داشت. پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ و $0/5-$ بار در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) بیشترین اثر را بر افزایش جوانه‌زنی بذر باقلا به ترتیب $25/0$ ، $21/7$ ، $22/2$ و $17/6$ درصد داشتند (شکل ۲).

سرعت جوانه‌زنی: برهمکنش پرایمینگ با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تنش خشکی بر سرعت جوانه‌زنی بذر باقلا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین سرعت جوانه‌زنی بذر در محدوده‌ی $5/4$ الی $5/8$ متعلق به پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شاهد (عدم اعمال تنش خشکی) بود (جدول ۳). تشدید تنش خشکی سبب کاهش قابل توجه سرعت جوانه‌زنی بذر باقلا گردید. با این حال پرایمینگ بذر با

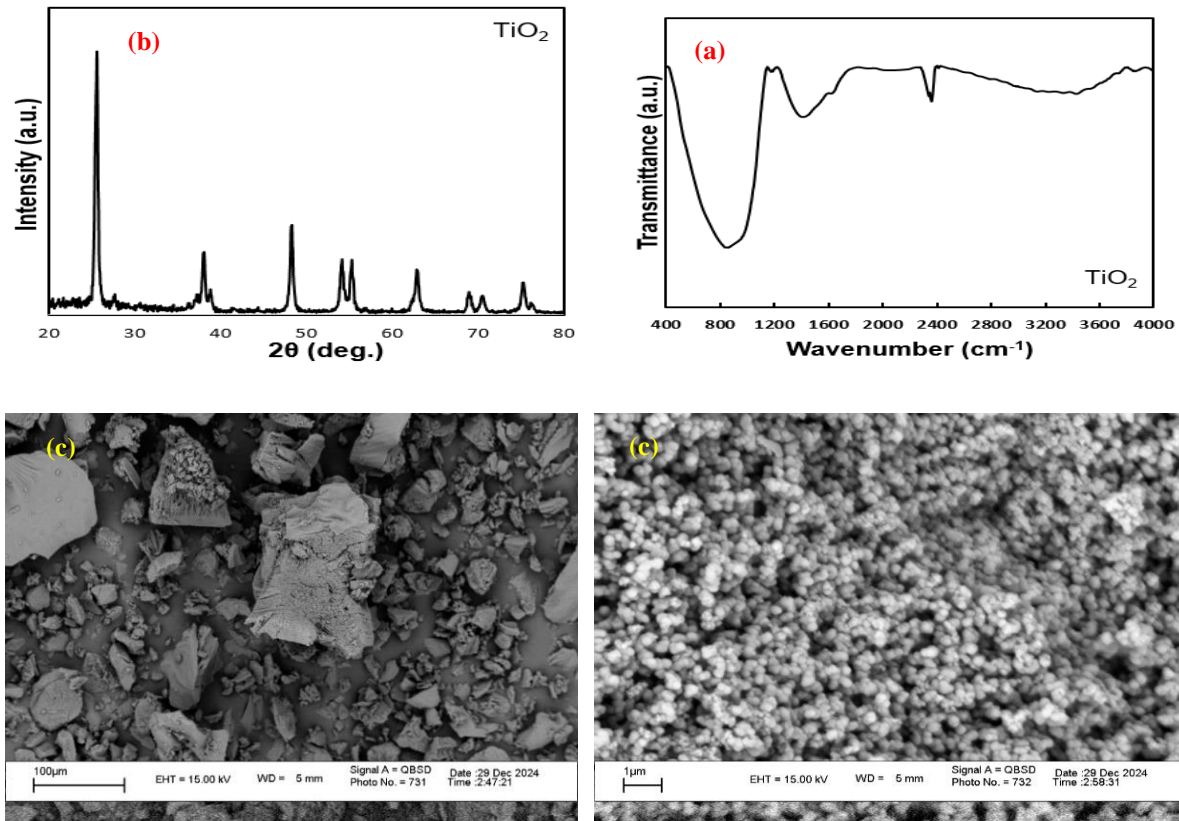
۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. به میزان دو میلی‌لیتر از عصاره حاصل، دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین که $1/25$ گرم پودر نین‌هیدرین را در ۳۰ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال حل نموده و سپس دو میلی‌لیتر اسید فسفریک شش مولار و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال خالص به آن اضافه شد. لوله‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده شد و سپس چهار میلی‌لیتر تولوئن به هریک از لوله‌ها اضافه و به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه توسط دستگاه ورتکس مخلوط شدند. فاز رنگی بالایی با دقت جدا و تغییرات جذب آن‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV 2100 ساخت آمریکا در طول موج 520 نانومتر قرائت شد. غلظت پرولین براساس میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاهی با استفاده از منحنی استاندارد تهیه شده با پرولین تعیین شد.

تجزیه آماری: تجزیه آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS9.4، مقایسه میانگین‌ها با آزمون 5% LSD انجام شد. ترسیم شکل درصد جوانه‌زنی بذر با نرم افزار Excel و ترسیم شکل‌های طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ و پراش اشعه ایکس با نرم‌افزار Origin2022 انجام شد.

نتایج و بحث

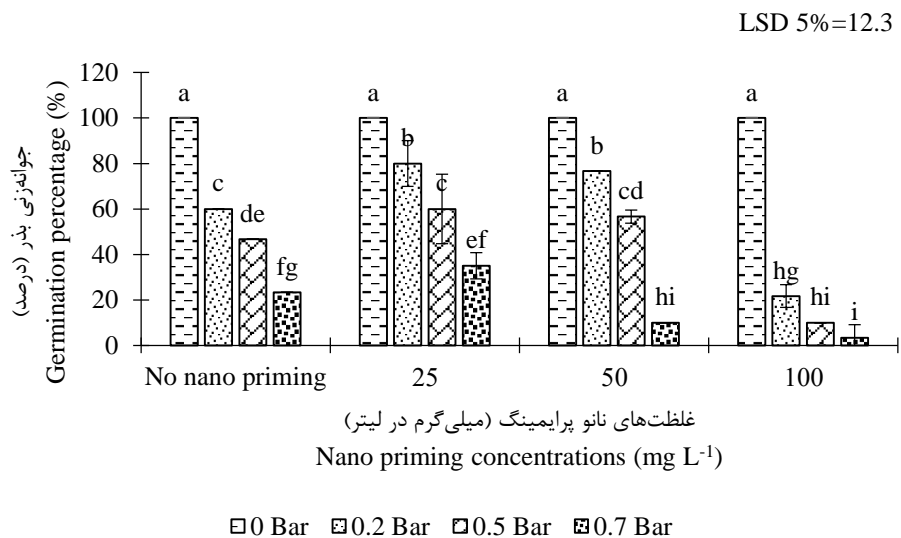
ویژگی‌های شیمیایی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم:

به‌منظور بررسی ساختار شیمیایی و گروه‌های عاملی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده از آزمون طیف-سنجی تبدیل فوریه فرسرخ استفاده شد. همانطور که در نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ در شکل (۱-a) نشان داده شده است، پیک‌های جذبی پهن در ناحیه cm^{-1} $500-800$ و $3200-3600$ مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H و Ti-O-Ti در نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده می‌باشند (Pham et al., 2021; Yuan et al., 2021). برای بررسی ویژگی‌ها و ساختار کریستالی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم از پراش اشعه ایکس استفاده شد. الگوهای پراش اشعه ایکس نانوذرات سنتز شده در شکل (۱-b) نشان می‌دهد که پیک‌های مشخصه در $25/5$ ، 38 ، $48/2$ ، $54/1$ ، $55/3$ ، 63 ، 69 ، $70/6$ و $75/3^\circ$ به ترتیب متعلق به صفحات کریستالی (۱۰۱)، (۰۰۴)، (۲۰۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۲۰۴)، (۱۱۶)، (۲۲۰) و (۲۱۵) فاز



شکل ۱- نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) (a)، پراش اشعه ایکس (XRD) (b) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) (c) نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم

Figure 1. Results of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) (a), X-ray diffraction (b), and scanning electron microscope (SEM) (c) of TiO₂ nanoparticles



شکل ۲- اثر برهمکنش پرایمینگ با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تنش خشکی بر درصد جوانه‌زنی بذر باقلا
Figure 2. Interaction effect of priming with TiO₂ nanoparticles and drought stress on faba bean seed germination percentage

خشک گیاهچه باقلا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش قابل توجه وزن تر و خشک گیاهچه باقلا گردید، به طوری که در مقایسه با شاهد (عدم اعمال تنش خشکی) پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ و $0/5-$ و $0/7-$ بار منجر به کاهش وزن تر ($10/0$ ، $33/8$ و $49/2$ درصد) و وزن خشک ($7/4$ ، $22/2$ و $51/8$ درصد) شد (جدول ۳). همچنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که پرایمینگ بذر باقلا با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود رشد گیاهچه باقلا شد. با این حال افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) سبب کاهش و تشدید اثر تنش خشکی بر گیاهچه باقلا گردید (جدول ۳). غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ ، $0/5-$ و $0/7-$ بار در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) در پتانسیل‌های اسمزی مشابه منجر به کاهش وزن تر ($18/1$ ، $6/6$ و 100 درصد) و وزن خشک ($24/0$ ، $28/5$ و 100 درصد) شد (جدول ۳).

ویژگی‌های فیزیولوژیک در گیاهچه باقلا: نتایج نشان می‌دهد که برهمکنش پرایمینگ بذر باقلا با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تنش خشکی بر فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

فعالیت آنزیم کاتالاز: تشدید تنش خشکی فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد، به طوری که در مقایسه با شاهد (عدم اعمال تنش خشکی)، پتانسیل اسمزی $0/7-$ بار منجر به افزایش $12/6$ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز شد (جدول ۵). پرایمینگ بذر باقلا با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ و $0/5-$ بار در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) شد؛ به طوری که فعالیت آنزیم کاتالاز در این پتانسیل‌های اسمزی ($0/2-$ و $0/5-$ بار) به ترتیب $4/0$ ، $1/7$ ، $5/9$ و $3/4$ درصد کاهش یافت (جدول ۵). افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به تشدید تنش خشکی و افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در بذر باقلا گردید. پرایمینگ بذر با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ و $0/5-$ بار

غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل اسمزی $0/2-$ بار در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ بذر در همان پتانسیل اسمزی سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر باقلا به ترتیب $37/3$ و $16/7$ درصد شد (جدول ۳). اثر افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم همسو با کاهش درصد جوانه‌زنی بود، به طوری که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به کاهش قابل توجه درصد و سرعت جوانه‌زنی در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ بذر در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ ، $0/5-$ و $0/7-$ بار شد (جدول ۳).

طول ریشه‌چه: نتایج نشان داد که برهمکنش پرایمینگ بذر باقلا با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تنش خشکی بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش خشکی منجر به کاهش قابل توجه طول ریشه‌چه گردید؛ به طوری که پتانسیل اسمزی $0/7-$ بار در مقایسه با شاهد در شرایط عدم اعمال پرایمینگ بذر منجر به کاهش $57/6$ درصدی طول ریشه‌چه شد (جدول ۳). با این حال افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش طول ریشه‌چه شد، به طوری که در غلظت‌های ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ بذر) به ترتیب $30/6$ ، $27/7$ و $10/3$ درصد افزایش طول ریشه‌چه ثبت شد (جدول ۳).

طول ساقه‌چه: نتایج نشان داد که طول ساقه‌چه نیز با افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط بدون اعمال تنش خشکی افزایش می‌یابد. غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) سبب افزایش طول ساقه‌چه به ترتیب $3/9$ ، $11/1$ و $17/2$ درصد شدند (جدول ۳). با این حال افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم همراه با تشدید تنش خشکی نتوانست اثر قابل توجهی بر بهبود رشد و طول ساقه‌چه بذر باقلا داشته باشد. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر در پتانسیل‌های اسمزی $0/2-$ و $0/5-$ بار در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) در پتانسیل‌های اسمزی مشابه سبب افزایش $18/1$ و $33/3$ درصدی طول ساقه‌چه شدند (جدول ۳).

وزن تر و خشک گیاهچه: برهمکنش پرایمینگ بذر باقلا با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و تنش خشکی بر وزن تر و

پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدی را در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) به ترتیب ۲/۰ و ۹/۴ درصد و ۰/۲ و ۶/۸ درصد کاهش دهد (جدول ۵). این در حالی است که افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب تشدید تنش خشکی و افزایش پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهچه باقلا می‌شود. پرایمینگ بذر با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل‌های اسمزی ۰/۲- و ۰/۵- بار در مقایسه

فعالیت آنزیم کاتالاز را به ترتیب ۳/۰، ۳/۹ و ۲/۱ درصد افزایش داد (جدول ۵).

پراکسیداسیون لیپیدی: تشدید تنش خشکی منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدی در شرایط عدم اعمال پرایمینگ بذر شد. پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی در پتانسیل‌های اسمزی ۰/۵- و ۰/۷- بار در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) و کاهش اثرات تنش خشکی در بذر شد. نتایج نشان داد که

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر نانوپرایمینگ و تنش خشکی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و شاخص‌های طولی و وزنی گیاهچه باقلا

Table 2. Results of variance analysis of the effect of nano priming and drought stress on germination characteristics and length and weight indices of faba bean seedling

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Plumule length	وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight
نانوپرایمینگ (NP) Nano priming (NP)	3	2722.91**	3.63**	0.156**	0.045 ^{ns}	0.266**	0.003**
تنش خشکی (DS) Drought stress (DS)	3	14228.47**	62.43**	4.91**	29.23**	0.685**	0.005**
نانوپرایمینگ × تنش خشکی NP×DS	9	532.63**	0.71**	0.27**	0.153**	0.084**	0.0004**
خطای آزمایش Error	32	51.56	0.13	0.032	0.019	0.003	0.00007
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	13.0	14.9	14.3	11.5	7.3	11.9

** و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم وجود تفاوت معنی‌داری می‌باشد.
** and ns denote significant difference at $p \leq 0.01$ and non-significant, respectively.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر نانوپرایمینگ و تنش خشکی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و شاخص‌های طولی و وزنی گیاهچه باقلا

Table 3. Results of comparing the mean effect of nano priming and drought stress on germination characteristics and length and weight indices of faba bean seedling

نانوپرایمینگ Nano priming	تنش خشکی (بار) Drought stress (Bar)	سرعت جوانه‌زنی (بذر/روز) Germination rate (seed/day)	طول ریشه‌چه (سانتیمتر) Radicle length (cm)	طول ساقه‌چه (سانتیمتر) Plumule length (cm)	وزن تر گیاهچه (گرم) Seedling fresh weight (g)	وزن خشک گیاهچه (گرم) Seedling dry weight (g)
شاهد (عدم پرایمینگ) Control (No priming)	0	5.7 _a	1.7 _b	3.2 _c	1.0 _b	0.09 _{abc}
	-0.2	1.9 _{cd}	1.2 _{cd}	0.9 _{de}	0.9 _c	0.08 _{bcd}
	-0.5	1.3 _e	1.1 _{cdef}	0.4 _{gh}	0.7 _{gh}	0.07 _{cd}
	-0.7	0.6 _{gh}	0.7 _g	0.0 _i	0.5 _i	0.04 _g
25 mg L ⁻¹	0	5.7 _a	1.9 _b	3.3 _c	1.1 _a	0.09 _{ab}
	-0.2	3.1 _b	1.3 _c	1.1 _d	0.9 _{cde}	0.09 _{ab}
	-0.5	2.1 _{cd}	1.1 _{cdef}	0.7 _{efg}	0.9 _{cd}	0.8 _{bc}
	-0.7	1.2 _{ef}	0.8 _{fg}	0.0 _i	0.8 _{def}	0.6 _{ef}
	0	5.4 _a	2.4 _a	3.6 _b	1.1 _{ab}	0.1 _a
50 mg L ⁻¹	-0.2	2.3 _c	1.2 _{cde}	0.7 _{ef}	0.8 _{cde}	0.09 _{abc}
	-0.5	1.6 _{de}	1.0 _{cdefg}	0.6 _{fgh}	0.8 _{cde}	0.08 _{bc}
	-0.7	0.3 _{gh}	0.9 _{efg}	0.0 _i	0.8 _{ef}	0.07 _{cd}
	0	5.8 _a	2.5 _a	3.8 _a	1.0 _b	0.08 _{bc}
100 mg L ⁻¹	-0.2	0.6 _{fg}	1.0 _{cdef}	0.5 _{gh}	0.7 _{fg}	0.06 _{ef}
	-0.5	0.3 _{gh}	0.9 _{defg}	0.4 _h	0.6 _h	0.05 _{fg}
	-0.7	0.08 _h	0.00 _h	0.0 _i	0.0 _j	0.0 _h
LSD 5%	-	0.6	0.3	0.2	0.09	0.01

میانگین‌های با یک حرف مشترک در آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by same letter are not significantly different at $p \leq 0.05$ by LSD multiple range test.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر نانوپرایمینگ و تنش خشکی بذر باقلا بر فعالیت آنزیم کاتالاز،

پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین

Table 4. Results of variance analysis of the effect of nano priming and drought stress of faba bean seed on catalase enzyme activity, lipid peroxidation, and proline content

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme activity	پراکسیداسیون لیپیدی Lipid peroxidation	محتوی پرولین Proline content
نانوپرایمینگ Nano priming (NP)	3	195.46**	21.21**	0.060**
تنش خشکی Drought stress (DS)	3	374.35**	115.92**	0.747**
نانوپرایمینگ×تنش خشکی NP×DS	9	20.89*	3.36*	0.005**
خطای آزمایش Error	32	8.71	1.57	0.0004
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	2.1	2.8	1.6

**، * و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم وجود تفاوت معنی‌داری می‌باشد.
**، * and ns denote significant difference at $p \leq 0.01$, 0.05 , and non-significant respectively.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر نانوپرایمینگ و تنش خشکی بذر باقلا بر فعالیت آنزیم کاتالاز،

پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین

Table 5. Results of comparing the mean effect of nano priming and drought stress of faba bean seed on catalase enzyme activity, lipid peroxidation, and proline content

نانوپرایمینگ Nano priming	تنش خشکی (بار) Drought stress (Bar)	فعالیت آنزیم کاتالاز (تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) Catalase enzyme activity (OD $\mu\text{g protein}/\text{min}^{-1}$)	پراکسیداسیون لیپیدی (میکرومول بر گرم وزن تر) Lipid peroxidation ($\mu\text{mol}/\text{g FW}$)	محتوی پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Proline content (mg/g FW)
شاهد (عدم پرایمینگ) Control (No priming)	0 -0.2 -0.5 -0.7	128.2h 138.8cde 143.1bc 146.8ab	40.4g 42.6ef 44.0ed 50.1a	0.9h 1.2f 1.4b 1.5a
25 mg L ⁻¹	0 -0.2 -0.5 -0.7	130.5gh 133.2fg 134.6efg 142.6bcd	40.5g 41.5fg 43.1ef 45.3cd	0.8i 1.1g 1.2e 1.3d
	0 -0.2 -0.5 -0.7	135.7ef 136.3ef 138.1de 145.8ab	40.1g 42.6ef 43.9ed 46.6bc	0.8i 1.1fg 1.3cd 1.3c
	0 -0.2 -0.5 -0.7	137.8def 143.1bc 149.0a 0.0i	41.7fg 43.9ed 47.3b 0.0h	0.9h 1.2e 1.4b 0.0j
100 mg L ⁻¹	0 -0.2 -0.5 -0.7	137.8def 143.1bc 149.0a 0.0i	41.7fg 43.9ed 47.3b 0.0h	0.9h 1.2e 1.4b 0.0j
LSD 5%	-	4.8	1.9	0.03

میانگین‌های با یک حرف مشترک در آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
Means followed by same letter are not significantly different at $p \leq 0.05$ by LSD multiple range test.

تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) در شرایط تنش خشکی کاهش یافت (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که علیرغم بهبود شرایط تنش توسط این غلظت‌ها، افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش محتوی پرولین در گیاهچه باقلا می‌شود

با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ) در پتانسیل‌های اسمزی مشابه، پراکسیداسیون لیپیدی را به ترتیب ۲/۹ و ۷/۰ درصد افزایش داد (جدول ۵).

محتوی پرولین: محتوی پرولین در اثر پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید

که نانوذرات می‌توانند از طریق ایجاد منافذ جدید و بزرگ در پوسته بذر فرآیند جذب آب در داخل جنین را تسهیل کرده و سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر شوند (Asli and Neumann, 2009). بنابراین در این آزمایش پرایمینگ بذر با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان برترین غلظت پرایمینگ برای بهبود شرایط تنش خشکی در جوانه‌زنی بذر باقلا شناخته شد.

افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به تشدید تنش خشکی و کاهش مضاعف جوانه‌زنی بذر باقلا گردید. اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر جوانه‌زنی بذر و گیاهان وابسته به عوامل محیطی، تنوع گونه‌های گیاهی و غلظت‌های اعمال شده آن‌ها می‌باشد (Tan *et al.*, 2018; Wahid *et al.*, 2020). غلظت‌های بالای نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم عمدتاً به دلیل افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و تخریب سلولی منجر به تخریب بذر و کاهش جوانه‌زنی می‌شوند (Rico *et al.*, 2015). گزارش‌های متعددی بر اثرات مضر غلظت‌های بالای نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم اشاره کرده‌اند (Rastogi *et al.*, 2017; Paramo *et al.*, 2020). این در حالی است که پرایمینگ با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و وزن تر و خشک گیاهچه باقلا در پتانسیل‌های اسمزی ۰/۲- و ۰/۵- بار شدند. پژوهشگران بیان کرده‌اند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم می‌توانند از طریق کاهش پایداری دیوار سلولی منجر به انبساط سلولی و افزایش رشد گیاهچه در تنش خشکی شوند (Mohammadi *et al.*, 2016). در بررسی دیگری پژوهشگران بیان کرده‌اند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نقشی مشابه هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکینین و جیبرلین ایفاء می‌کند و سبب القای تقسیم و توسعه سلولی می‌شود (Sauret-Güeto *et al.*, 2012). اگرچه اولین فرضیه آزمایشی بر اساس اثر مثبت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش غلظت بر کاهش اثر تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلایکول مطرح شد؛ اما نتایج نشان داد که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شدت‌های بالاتر تنش خشکی در نهایت منجر به کاهش قابل توجه جوانه‌زنی بذر و ویژگی‌های وابسته به آن از جمله شاخص‌های وزنی و طولی گیاهچه باقلا می‌شوند. احتمال می‌رود سطح ویژه نانوذرات، گروه‌های عاملی، واکنش پذیری و تمایل آن‌ها به

(جدول ۵). کاهش ۳/۴، ۱۲/۰ و ۱۴/۵ درصدی محتوی پرولین در پتانسیل‌های اسمزی ۰/۲-، ۰/۵- و ۰/۷- بار در غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کاهش ۲/۲، ۸/۳ و ۱۱/۷ درصدی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با شاهد (عدم اعمال پرایمینگ)، نشان‌دهنده اثر مثبت این غلظت‌ها بر کاهش اثر تنش خشکی است (جدول ۵).

جوانه‌زنی بذر فرآیندی است که به شدت وابسته به فراهمی آب است (Safaeipour *et al.*, 2023) که می‌تواند منجر به مهار کامل جوانه‌زنی بذر گردد. نتایج این مطالعه نشان داد که اثر تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلایکول منجر به کاهش قابل توجه جوانه‌زنی بذر و ویژگی‌های وابسته به آن در گیاهچه باقلا گردید. شدیدترین تنش خشکی اعمال شده (پتانسیل اسمزی ۰/۷- بار) در مقایسه با شاهد منجر به کاهش ۷۶ درصدی جوانه‌زنی بذر باقلا شد. این در حالی است که پرایمینگ بذر باقلا با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ در پتانسیل اسمزی مشابه تنها ۶۵ درصد کاهش جوانه‌زنی بذر را ثبت کرد. اختلاف در کاهش جوانه‌زنی بذر باقلا نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر توانسته سبب بهبود شرایط بذر در محیط تنش و افزایش درصد جوانه‌زنی بذر در همه پتانسیل‌های اسمزی به خصوص پتانسیل اسمزی ۰/۷- بار شود. به‌طور مشابه احمدنیا و همکاران (Ahmadnia and Ebadi, 2024) گزارش کرده‌اند که اثر پرایمینگ بذر سان‌همپ (*Crotalaria juncea*) با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود جوانه‌زنی بذر در شرایط تنش شده است. پژوهشگران اظهار داشته‌اند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم می‌توانند واکنش اکسیداسیون - احیاء را توسط رادیکال‌های یون سوپراکسید در طول زمان جوانه‌زنی بذر القاء کنند و منجر به حذف گونه‌های آزاد اکسیژن در بذرهای در حال جوانه‌زنی شوند (Faraji and Sepehri, 2019). از سوی دیگر، اکسیژن تولید شده در این فرآیندها نیز می‌تواند در تنفس مصرف و موجب افزایش جوانه‌زنی بذر شود (Faraji and Sepehri, 2019). پژوهشگران در بررسی دیگری نشان داده‌اند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در پتانسیل اسمزی ۰/۴- مگاپاسکال منجر به افزایش ۲۳ درصدی جوانه‌زنی بذر شد (Faraji and Sepehri, 2019). همچنین بیان شده است

دی‌اکسید تیتانیوم با سطوح بالای تنش خشکی منجر به افزایش محتوی پراکسیداسیون لیپیدی، محتوی پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله کاتالاز می‌شوند (Ramadan et al., 2022). در بررسی دیگری خان و همکاران (Khan et al., 2020) نشان دادند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تولید آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی را در تنش خشکی در گیاهچه باقلا افزایش می‌دهند.

نتیجه‌گیری کلی

تنش خشکی اثرات قابل توجهی بر کاهش جوانه‌زنی بذر باقلا داشت. پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب کاهش شدت تنش شده و گیاهچه‌های باقلا در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ بذر در شرایط محیطی بهتری رشد یافت، به طوری که فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ بذر در تمام سطوح تنش خشکی کاهش یافته است. همچنین افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) منجر به هم‌افزایی شرایط تنش و افزایش مضاعف فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ شد. اثرات مثبت و منفی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در کاهش شدت تنش خشکی و اثر آن بر جوانه‌زنی بذر باقلا و رشد گیاهچه وابسته به غلظت مورد استفاده بود.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی مصوب ۱۴۰۳/د/۹/۳۷۰۱ در شورای پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی است. نویسندگان مقاله مراتب سپاسگزاری خود را از حمایت‌های مالی دانشگاه محقق اردبیلی، دوستان و همکارانی که در این طرح پژوهشی ما را یاری نمودند، اعلام می‌نمایند.

تجمع از دیگر دلایل احتمالی اثرات منفی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های بالا باشد (Kobayashi et al., 2019).

یکی از پیامدهای اجتناب‌ناپذیر تنش خشکی، افزایش محتوی پراکسیداسیون لیپیدی، فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان شاخص کلیدی تنش اکسیداتیو و محتوی پرولین به عنوان عاملی در دفاع آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی است. نتایج این بررسی نشان داد که با تشدید تنش اسمزی، محتوی پرولین، محتوی پراکسیداسیون لیپیدی و فعالیت آنزیم کاتالاز در عدم اعمال پرایمینگ بذر در مقایسه با پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد کاهش اثرات تنش خشکی توسط نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و بهبود رشد گیاهچه در این غلظت‌ها منجر به کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و محتوی پراکسیداسیون لیپیدی شده است. این در حالی است که افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) منجر به افزایش مضاعف فعالیت آنزیم کاتالاز، محتوی پراکسیداسیون لیپیدی و محتوی پرولین در مقایسه با عدم اعمال پرایمینگ بذر گردید. براساس این نتایج به نظر می‌رسد اثرات مثبت و منفی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم وابسته به غلظت اعمال شده آن است. برای مثال اشرف و فولاد (Ashraf and Foolad, 2007) بیان کرده‌اند که محتوی پرولین پتانسیل بالایی در هیدراتاسیون داشته و نقش محافظتی در ساختار سلول‌های گیاهی ایجاد می‌کند. هنگامی که گیاه در معرض تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرد، تجمع پرولین و تعامل آن با پروتئین‌ها منجر به ایجاد یک اسکلت پایدار آب‌گریز و تثبیت ساختار غشای سلولی می‌گردد (Ramadan et al., 2022). همچنین پرولین یکی از جاذب‌های گونه‌های فعال اکسیژن است که از طریق کلات کردن آن‌ها و افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و غیره، آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو احتمالی را کاهش می‌دهد (Yang et al., 2021). پژوهشگران گزارش کرده‌اند که غلظت‌های بالا نانوذرات

منابع

Abdel Latef, A. A., Hasanuzzaman, M. and Tahjib-Ul-Arif, M. 2021. Mitigation of salinity stress by exogenous application of cytokinin in faba bean (*Vicia faba* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49:1-22. DOI:10.15835/nbha49112192 (Journal)

- Abid, G., Hessini, K., Aouida, M., Aroua, I., Baudoin, J. P., Muhovski, Y., Mergeai, G., Sassi, K., Machraoui, M., Souissi, F. and Jebara, M. 2017. Agro-physiological and biochemical responses of faba bean (*Vicia faba* L. var. 'minor') genotypes to water deficit stress. *Biotechnology, Agronomic, Soc Environnement*, 21:146-159. DOI: 10.25518/1780-4507.13579 **(Journal)**
- Ahmadnia, F. and Ebadi, A. 2024. Evaluation of improving Sunn hemp (*Crotalaria juncea*) seed germination with titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 11(1): 69-87. DOI: 10.22124/jms.2024.8039 (In Persian) **(Journal)**
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Alebrahim, M. T., Parmoon, G., Feizpoor, S. and Hashemi, M. 2025. The efficacy of Sunn Hemp (*Crotalaria juncea*) and Fe₃O₄ nanoparticles in controlling weed seed germination. *Agronomy*, 15(795): 1-21. DOI: 10.3390/agronomy15040795 **(Journal)**
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi, M., Ghavidel, A. and Alebrahim, M. T. 2023. Investigating the effect of aqueous extracts of sunn hemp (*Crotalaria juncea*) and oats (*Avena sativa* L.) on the germination of wild mustard weed (*Sinapis arvensis*). *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 10(2): 1-19. DOI: 10.22124/jms.2023.760 (In Persian) **(Journal)**
- Alharby, H. F. M., Rizwan, A., Iftikhar, K. M., Hussaini, M. Z., Ur Rehman, A. A., Bamagoos, B. M., Alharbi, M., Asrar, T., Yasmeen, S. and Ali, S. 2021. Effect of gibberellic acid and titanium dioxide nanoparticles on growth, antioxidant defense system and mineral nutrient uptake in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221(2021),112436:1-10. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112436 **(Journal)**
- Amooaghaie, R., Majidi, M. and Farhadian, S. 2021. Impact of nano -TiO₂ on salt stress tolerance of *Carum copticum*. *Journal of Plant Process and Function Iranian Society of Plant Physiology*, 11(48):19-33. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1560-fa.html> (In Persian) **(Journal)**
- Aragay, G., Pino, F. and Merkoçi, A. 2012. Nanomaterials for sensing and destroying pesticides. *Chemical Review*,112(10): 5317-5338. DOI:10.1021/cr300020c **(Journal)**
- Ashraf, M. and Foolad, M. R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2): 206-216. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006 **(Journal)**
- Asli, S. and Neumann, P. M. 2009. Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, Cell and Environment*, 32(5): 577-584. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19210640> **(Journal)**
- Bates, L. S., Walderen, R. D. and Taere I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207. DOI: 10.1007/BF00018060 **(Journal)**
- Cox, J. D., Silveiro, I. and Garcia de Abajo, F. J. 2016. Quantum effects in the nonlinear response of Graphene plasmons. *ACS Nano Journal*, 10(2): 1995-2003. DOI:10.1021/acsnano.5b06110. **(Journal)**
- Etemadi, F., Barker, A. V. and Hashemi, M. 2018. Nutrient accumulation in faba bean varieties. *Communication Soil Science Plant Analysis*, 49(16): 2064-2073. DOI:10.1080/00103624.2018.1495729 **(Journal)**
- Faraji, J. and Sepehri, A. 2019. Ameliorative effects of TiO₂ nanoparticles and sodium nitroprusside on seed germination and seedling growth of wheat under PEG-stimulated drought stress. *Journal of Seed Science*, 41(3): 309-317. DOI:10.1590/2317-1545v41n3213139 **(Journal)**
- Ghassemi-Golezani, K. and Hosseinzadeh-Mahootchy, A. 2009. Changes in seed vigour of faba bean (*Vicia faba* L.) cultivars during development and maturity. *Seed Science and Technology*, 37(3): 713-720. DOI: 10.15258/sst.2009.37.3.18 **(Journal)**
- Gill, S. S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology Biocenology*, 48(12): 909-930. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.08.016 **(Journal)**
- Hatami, M., Ghorbanpour, M. and Salehjarjomand, H. 2014. Nano-anatase TiO₂ modulates the germination behavior and seedling vigority of some commercially important medicinal and aromatic plants. *Journal of Biological Environment*, 8(22): 53-59. **(Journal)**
- Kabbadj, A., Makoudi, B., Mouradi, M., Pauly, N., Frendo, P. and Ghoulam, C. 2017. Physiological and biochemical responses involved in water deficit tolerance of nitrogen-fixing *Vicia faba*. *PLoS ONE*, 12(12): e0190284, 1-19. DOI: 10.1371/journal.pone.0190284 **(Journal)**

- Khalifa, A. M., Safhi, F. A. and Elsherif, D. E. 2024. Green synthesis of a dual-functional sulfur nanofertilizer to promote growth and enhance salt stress resilience in faba bean. *BMC Plant Biology*, 24, 607, 1-16. DOI:10.1186/s12870-024-05270-7 (**Journal**)
- Khan, M. N., AlSolami, M. A., Basahi, R. A., Siddiqui, M. H., Al-Huqail, A. A., Abbas, Z. K., Siddiqui, Z. H., Ali, H M. and Khan, F. 2020. Nitric oxide is involved in nano-titanium dioxide-induced activation of antioxidant defense system and accumulation of osmolytes under water-deficit stress in *Vicia faba* L. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 190:110152. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.110152 (**Journal**)
- Khandekar, D. C., Bhattacharyya, A. R. and Bandyopadhyaya, R. 2021. Role of axial versus radial pore orientation in mesoporous silica particles, on its effect in photocatalysis via impregnated TiO₂ nanoparticles in pores. *Chemical Engineering Journal Advances*, 5 (2021): 100075, 1-8. DOI: 10.1016/j.ceja.2020.100075 (**Journal**)
- Kobayashi, K., Kubota, H., Hojo, R. and Miyagawa, M. 2019. Effective dispersal of titanium dioxide nanoparticles for toxicity testing. *Journal of Toxicological Sciences*, 44(8):515–521. DOI:10.2131/jts.44.515 (**Journal**)
- Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y. and Kolmakov, A. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*, 408(16): 3053-3061. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.031 (**Journal**)
- Maalouf, F., Abou-Khater, L., Babiker, Z., Jighly, A., Alsamman, AM., Hu, J., Ma, Y., Rispaill, N., Balech, R., Hamweih, A., Baum, M. and Kumar, S. 2022_a. Genetic dissection of heat stress tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.) using GWAS. *Plants*, 11(9): 1108, 1-17. DOI:10.3390/plants11091108 (**Journal**)
- Maalouf, F., Ahmed, S. and Bishaw, Z. 2022_b. Chapter 6. In: *Faba Bean. Beans and Peas*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, pp: 105–131. (**Book**)
- Maguire, J. D. 1962. Speed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. *Crop Science*, 2(2):176-177. DOI:10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x (**Journal**)
- Marambe, B. and Ando, T. 1992. Phenolic acids as potential seed germination-inhibitors in animal-waste composts. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38(4): 727-733. DOI:10.1080/00380768.1992.10416703 (**Journal**)
- Martínez, J. P., Silva, H., Ledent, J. F. and Pinto, M. 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*, 26(1):30-38. DOI: 10.1016/j.eja.2006.08.003 (**Journal**)
- Mathew, S. S., Sunny, N. E. and Shanmugam, V. 2021. Green synthesis of anatase titanium dioxide nanoparticles using *Cuminum cyminum* seed extract; effect on Mung bean (*Vigna radiata*) seed germination. *Inorganic Chemistry Communications*, 126: 108485, 1-18. DOI: 10.1016/j.inoche.2021.108485 (**Journal**)
- Michel, B. E. and Kaufmann, M. R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51(5):914-916. DOI: 10.1104/pp.51.5.914 (**Journal**)
- Mohammadi, H., Esmailpour, M. and Gheranpaye, A. 2016. Effects of TiO₂ nanoparticles and water-deficit stress on morpho-physiological characteristics of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2): 385-396. DOI: 10.14720/aas.2016.107.2.11 (**Journal**)
- Mustafa, H., Ilyas, N., Akhtar, N., Raja, N. I., Zainab, T., Shah, T., Ahmad, A. and Ahmad, P. 2021. Biosynthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles and its effects along with calcium phosphate on physicochemical attributes of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021(223): 112519, 1-15. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112519 (**Journal**)
- Navarro, E., Piccapietra, F., Wagner, B., Marconi, F., Kaegi, R., Odzak, N. and Behra, R. 2008. Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science and Technology*, 42(23): 8959-8964. DOI: 10.1021/es801785m (**Journal**)
- Noman, M. T., Ashraf, M. A. and Ali, A. 2019. Synthesis and applications of nano-TiO₂: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 3262-3291. DOI: 10.1007/s11356-018-3884-z (**Journal**)

- Ouji, A., Naouari, M., Mouelhi, M. and Ben Younes, M. 2017. Yield and yield components of faba bean (*Vicia faba* L.) as influenced by supplemental irrigation under semi-arid region of Tunisia. *World Journal of Agricultural Research*, 5(1):52-57. DOI: 10.12691/wjar-5-1-7 **(Journal)**
- Paramo, L. A., Feregrino-Pe´rez, A. A., Guevara, R., Mendoza, S. and Esquivel, K. 2020. Nanoparticles in agroindustry: applications, toxicity, challenges, and trends. *Nanomaterials*, 10:1654. DOI: 10.3390/nano10091654 **(Journal)**
- Pazhouhan, I., Jalali, S. Gh. A., Atabati, H., Zarafshar, M. and Sattarian, A. 2016. Comparison of carbon nanotubes with chemical and physical treatments to break seed dormancy of *Myrtus communis* L. *Journal of Botany Research*, 29(2): 300-308. DOI: 20.1001.1.23832592.1395.29.2.6.0 **(Journal)**
- Perry, D.A. 1991. Methodology and application of vigor tests. International Seed Testing Association. Zurich. Switzerland. 275p. **(Book)**
- Pham, X. N., Pham, D. T., Ngo, H. S., Nguyen, M. B. and Doan, H. V. 2021. Characterization and application of C–TiO₂ doped cellulose acetate nanocomposite film for removal of Reactive Red-195. *Chemical Engineering Communications*, 208(3): 304-317. DOI: 10.1080/00986445.2020.1712375 **(Journal)**
- Raliya, R., Biswas, P. and Tarafdar, J. C. 2015_a. TiO₂ nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). *Biotechnology Reports*, 2015(5): 22-26. DOI: 10.1016/j.btre.2014.10.009 **(Journal)**
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N. and Biswas, P. 2015_b. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7(12): 1584-1594. DOI:10.1039/c5mt00168d **(Journal)**
- Ramadan, T., Sayed, S. A., Abd-Elaal, A. K. A. and Amro, A. 2022. The combined effect of water deficit stress and TiO₂ nanoparticles on cell membrane and antioxidant enzymes in *Helianthus annuus* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(2): 391-409. DOI: 10.1007/s12298-022-01153-z **(Journal)**
- Rastogi, A., Zivcak, M., Sytar, O., Kalaji, H. M., He, X., Mbarki, S. and Brestic, M. 2017. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review. *Frontiers in Chemistry*, 78:1-16. DOI: 10.3389/fchem.2017.00078 **(Journal)**
- Reddy, A. R., Chaitanya, K. V. and Vivekanandan, M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161(16): 1189-1202. DOI: 10.1016/j.jplph.2004.01.013 **(Journal)**
- Rico, C. M., Peralta-Videoa, J. R. and Gardea-Torresdey, J. L. 2015. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *Nanotechnology and Plant Science*, 2:1–17. DOI: 10.1007/978-3-319-14502-0_1 **(Journal)**
- Safaeipour, M., Nabavi Kalat, M. and Aghighi Shahverdi, M. 2023. Assessing the impact of seed priming by nanomaterials on stevia germination and biochemical attributes under drought stress. *Fundamental and Applied Agriculture*, 8(3): 615-626. DOI: 10.5455/faa.160768 **(Journal)**
- Sant´as-Miguela, V., Arias-Estevéz, M., Rodríguez-Seijo, A. and Arenas-Lago, D. 2023. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. *Environmental Pollution*, 334(2023),122222: 1-17. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122222 **(Journal)**
- Sauret-Güeto, S., Calder, G. and Harberd, N. P. 2012. Transient gibberellin application promotes *Arabidopsis thaliana* hypocotyl cell elongation without maintaining transverse orientation of microtubules on the outer tangential wall of epidermal cells. *Plant Journal*, 69(4): 628-639. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-313X.2011.04817.x> **(Journal)**
- Scott, S. J., Jones, R. A. and Williams, W. A. 1984. Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24(6): 1192-1199. DOI: 10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x **(Journal)**
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J. C., Bindraban, P. and Dimkpa, C. A. 2015. Review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(2): 1-21. DOI: 10.1007/s11051-015-2907-7 **(Journal)**
- Sharif, H., Mehmood, A., Ulfat, A., Ahmad, K. S., Hussain, I. and Khan, R. T. 2021. Environmentally sustainable production of silver nanoparticles and their effect on *Glycine max* L. Seedlings. *Gesunde Pflanzen*, 73(2021): 95-103. DOI: 10.1007/s10343-020-00532-4. **(Journal)**

- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Firoz, M. and Al-Khaishany, M. Y. 2015. Role of nanoparticles in plants. In nanotechnology and plant sciences. Springer International Publishing, Chapter 2:19-35. DOI: 10.1007/978-3-319-14502-0_2 **(Journal)**
- Stewart, R. C. and Beweley, J. D. 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65(2): 245248. DOI: 10.1104/pp.65.2.245 **(Journal)**
- Stoddard, F. L., Balko, C., Erskine, W., Khan, H. R., Link, W. and Sarker, A. 2006. Screening techniques and sources of resistance to abiotic stresses in cool-season food legumes. *Euphytica*, 147:167-186. DOI: 10.1007/s10681-006-6963-z **(Journal)**
- Sudhakar, C., Lakshmi, A. and Giridara Kumar, S. 2001. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science*, 167(3): 613-619. DOI: 10.1016/S0168-9452(01)00450-2 **(Journal)**
- Tan, W., Peralta-Videa, J. R. and Gardea-Torresdey, J. L. 2018. Interaction of titanium dioxide nanoparticles with soil components and plants: current knowledge and future research needs—a critical review. *Environmental Science: Nano Journal*, 5(8):257-278. DOI:10.1039/ C7EN00985B **(Journal)**
- Wahid, I., Kumari, S., Ahmad, R., Hussain, S. J., Alamri, S., Siddiqui, M. H. and Khan, M. I. R. 2020. Silver nanoparticle regulates salt tolerance in wheat through changes in ABA concentration, ion homeostasis, and defense systems. *Biomolecules*, 10(11):1506, 1-19. DOI:10. 3390/biom10111506 **(Journal)**
- Wang, K., Zhuo, Y., Chen, J., Gao, D., Ren, Y., Wang, C. and Qi, Z. 2020. Crystalline phase regulation of anatase–rutile TiO₂ for the enhancement of photocatalytic activity. *RSC advances*, 10(71): 43592-43598. DOI: 10.1039/d0ra09421h **(Journal)**
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae* 7(3):50, 1-36. DOI:10.3390/horticulturae7030050 **(Journal)**
- Yin, C., Peng, Y., Zang, R., Zhua, Y. and Li, C. 2005. Adaptive responses of *Populus kangdingensis* to drought stress. *Physiology Plant*, 123(4): 445-451. DOI:10.1111/j.1399-3054.2005.00477.x **(Journal)**
- Yuan, X., Wang, X., Zhang, Sh., Dong, X., Zhang, Sh., Zhou, W., Zhang, Ch. and Luo, Y. 2021. Synergistic enhancement of photocatalytic performance of mesoporous TiO₂ enabled by tunable crystal phase and hybridization with graphene oxide. *Chemistry Select*, 6(23): 5791-5800. DOI:10.1002/slct.202100784 **(Journal)**
- Zheng, L., Hong, F., Lu, S. and Liu, C. 2005. Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biological Trace Element Research*, 104(1): 83-91. DOI: 10.1385/BTER:104:1:083 **(Journal)**



The effect of titanium dioxide nanoparticles on improving Faba bean (*Vicia faba* L.) seed germination under drought stress

Ali Ebadi*¹, Fatemeh Ahmadnia²

Received: May 8, 2025

Accepted: July 14, 2025

Abstract

Drought stress is one of the most significant limiting factors in agricultural production. To investigate the effect of priming with titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) on faba bean seeds (*Vicia faba* L.) under drought stress, a factorial experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted at the Faculty of Agriculture Science and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University in the winter of 2024. Experimental treatments included seed priming with TiO₂ NPs (0, 25, 50, and 100 mg L⁻¹) and drought stress (0, -0.2, -0.5, and -0.7 Bar). TiO₂ NPs were synthesized by solgel method. FTIR, XRD, and SEM chemical analysis were used to identify the bonds and structure of the NPs. Seed germination percentage and related traits such as seedling length and weight indices, catalase enzyme activity, lipid peroxidation, and proline content were measured. The osmotic potential -0.7 Bar caused a 76% reduction in faba bean seed germination compared to the control. Concentrations of 25 and 50 mg L⁻¹ of TiO₂ NPs enhanced the germination percentage, germination rate, radicle and plumule length, seedling fresh and dry weight, proline content, lipid peroxidation, and catalase enzyme activity at all stress levels. Increasing the concentration of TiO₂ NPs to 100 mg L⁻¹ led to a synergistic effect under stress conditions, resulting in a twofold increase in the activity of enzymatic and non-enzymatic antioxidants, alongside a decrease in the germination percentage and its related traits compared to no seed priming. The positive and negative effects of TiO₂ NPs in alleviating the severity of drought stress and their impact on faba bean seed germination and seedling growth depended on the concentrations used.

Keywords: Lipid peroxidation; Nanoparticles; Priming; Proline; X-ray diffraction (XRD)

How to cite this article

Ebadi, A. and Ahmadnia, F. 2025. The effect of titanium dioxide nanoparticles on improving Faba bean (*Vicia faba* L.) seed germination under drought stress. Iranian Journal of Seed Science and Research, 12(2): 1-16. (In Persian) (**Journal**)
DOI: 10.22124/jms.2025.9375

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research
The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. Professor of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Ebadi@uma.ac.ir
 2. Postdoctoral Researcher of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. f.ahmadnia@uma.ac.ir
- *Corresponding author: Ebadi@uma.ac.ir