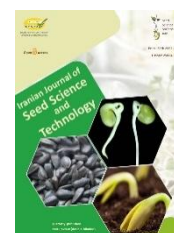




Iranian Journal of Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

Research Article

The effect of green synthesis of titanium dioxide nanoparticles with Sunn hemp (*Crotalaria juncae*) aqueous extract on the germination of Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) seed

Ali Ebadi^{1*}, Fatemeh Ahmadnia², Solmaz Feizpoor³

1. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Ph.D, Plant Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3. Postdoctoral Researcher, School of Integrated Circuits, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, P.R. China.

Article Information

Received: 14 Oct. 2024
Revised: 01 Jan. 2025
Accepted: 06 Jan. 2025

Keywords:

Concentration,
Germination,
Lipid peroxidation,
Thermogravimetric,
X-ray diffraction.

Corresponding Author:
ebadi@uma.ac.ir



Abstract

Developing new strategies such as using nanotechnology to control weeds is one of the ways to reduce the environment from improper use of chemical inputs. For this purpose, in 2024, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications on the germination of Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) seeds. Experimental treatments include aqueous extract of Sunn hemp (in concentrations of 0, 10, 15, and 20 g/L⁻¹) and TiO₂ NPs synthesized with aqueous extract of Sunn hemp (TiO₂ NPs synthesized without Sunn hemp extract (Control), TiO₂ NPs synthesized with 10, 15, and 20 g/L⁻¹ Sunn hemp aqueous extract). Green synthesis of TiO₂ NPs with Sunn hemp compared to Sunn hemp aqueous extract at concentrations of 10 and 15 g/L⁻¹ decreased germination by 30.56 and 43.01%. This study indicated that the TiO₂ NPs synthesized with Sunn hemp extract caused a 1.20 and 12.63 % increase in lipid peroxidation and decreased catalase enzyme activity by 3.84% and 5.72% in concentrations of 10 and 15 g/L⁻¹, compared to Sunn hemp aqueous extract. This experiment showed a strong inhibition of green synthesis of TiO₂ NPs using Sunn hemp aqueous extract on germination and related components in Redroot pigweed seeds.

How to cite this paper: Ebadi, A., Ahmadnia, F., & Feizpoor, S. (2026). The effect of green synthesis of titanium dioxide nanoparticles with Sunn hemp (*Crotalaria juncae*) aqueous extract on the germination of Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) seed. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 14 (4), 79-96. <https://doi.org/10.22092/ijst.2025.367299.1544>



© Authors, Published by Iranian Journal of Seed Science and Technology. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) is an annual, dicotyledonous weed with a C₄ photosynthetic pathway from the *Amaranthaceae* family, which is common in many agricultural fields. This plant is the third most common weed in the world and has been spread in 70 tropical and subtropical countries. Redroot pigweed seeds last in the soil for six to 10 years. Due to its aggressive growth, it competes with agricultural plants for water, light, and nutrients. Due to increased environmental pollution in recent decades and the phenomenon of resistance in weed species, environmental scientists emphasize the need to reduce the untargeted consumption of chemical inputs in agricultural ecosystems. The increase in environmental pollution has encouraged the development of new strategies such as nanotechnology for weed control.

Materials and Methods

This experiment was conducted in the spring of 2024 to study the impact of Sunn hemp (*Crotalaria juncea*) aqueous extract and the green synthesis of titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) using Sunn hemp aqueous extract on the seed germination of Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*). This research was conducted in the Seed Technology and Weed Science laboratories of the Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources at Mohaghegh Ardabili University using a factorial experiment based on a completely randomized design with three replications. The treatments include Sunn hemp aqueous extract at concentrations of 0, 10, 15, and 20 g/L⁻¹, and TiO₂ NPs synthesized with Sunn hemp aqueous extract. Concentrations were TiO₂ NPs without Sunn hemp aqueous extract (control), TiO₂ NPs with 10, 15, and 20 g/L⁻¹ of Sunn hemp aqueous extract. Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) seeds were collected from the Moghan region (31°39'N and 46°47'E) in the summer of 2023. The vigor of the Redroot pigweed was assessed, and 1500 mg/L⁻¹ gibberellic acid was used 24 hours to eliminate seed dormancy in dark conditions. 50 seeds of Redroot pigweed, after surface sterilization by 1% sodium hypochlorite, were randomly placed in 90mm diameter Petri dishes. Ten ml of treatments were added to each Petri dish for 14 days. Seeds with a radicle length of 2mm were considered as germinated. Catalase enzyme activity and lipid peroxidation were measured based on the methods of Sudhakar et al. 2001 and Stewart and

Bewley 1980 respectively.

Results and Discussion

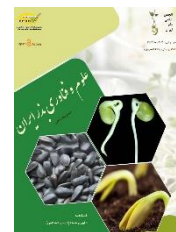
The results of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) of TiO₂ NPs and TiO₂ synthesized with Sunn hemp extract showed that the broad absorption peaks in the region of 500-800 cm⁻¹ and 3200-3600 cm⁻¹ correspond to the stretching vibrations of Ti-O-Ti, and O-H groups. The X-ray diffraction analysis revealed characteristic peaks at 25.5, 38, 48.2, 54.1, 55.3, 63, 69, 70.6, and 75.3°. These peaks correspond to crystal planes (101), (004), (200), (105), (211), (204), (116), (220), (215) of the anatase phase, and the peak at 27.8° corresponds to the crystal plane (110) of rutile titanium dioxide phase. Diffraction peaks correspond to the tetragonal structure of TiO₂ and a combination of the anatase phase with reference number 004-0477 and the rutile phase with reference number 088-1173-01. The results of thermal calorimetry analysis confirmed the high thermal stability of TiO₂ NPs synthesized with Sunn hemp extract. Treatment significantly interacted with germination percentage, germination rate, mean germination time, coefficient of germination velocity, radicle, and plumule length ($P \leq 0.05$). TiO₂ NPs synthesized with Sunn hemp compared to Sunn hemp aqueous extract at 10 and 15 g/L⁻¹ decreased germination by 30.56 and 43.01%. This study indicated that the TiO₂ NPs synthesized with Sunn hemp extract caused a 1.20 and 12.63 % increase in lipid peroxidation and decreased catalase enzyme activity by 3.84% and 5.72% with 10 and 15 g/L⁻¹ concentrations, compared to Sunn hemp aqueous extract.

Conclusion

The results indicated that the aqueous extract of Sunn hemp and TiO₂ synthesized with the Sunn hemp aqueous extract decreased germination, radicle, and plumule length as their concentration increased. Green synthesis of TiO₂ NPs with Sunn hemp aqueous extract showed greater inhibition than the Sunn hemp aqueous extract alone. The TiO₂ synthesized with the Sunn hemp aqueous extract significantly increased lipid peroxidation and decreased the catalase enzyme activity in Redroot pigweed seedlings compared to the Sunn hemp aqueous extract. More researches are needed to determine the effect of such treatments on other physiological traits of the Redroot pigweed. However, this study emphasizes the use of nanotechnology, and safe, and targeted methods to reduce weed germination and establishment.



نشریه علوم و فناوری بذر ایران



ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

اثر سنتز سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سانهمپ (*Crotalaria juncae*) بر جوانه زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*)

علی عبادی^{۱*}، فاطمه احمدنیا^۲، سولماز فیض پور^۳

۱. استاد، فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه آموزشی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. دکتری، فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه آموزشی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳. پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مدارهای مجتمع، آزمایشگاه ملی اپتوالکترونیک و وهان، دانشگاه علم و فناوری Huazhong، وهان، چین.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

واژه‌های کلیدی:

پراش اشعه ایکس،
پراکسیداسیون لیپیدی،
جوانه زنی،
گرماسنجی حرارتی،
غلظت.

نویسنده مسئول:

ebadi@uma.ac.ir

توسعه راهبردهای جدید مانند استفاده از فناوری نانو برای کنترل علف‌های هرز یکی از راه‌های کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از استفاده نادرست از نهاده‌های شیمیایی است. بدین منظور آزمایشی در سال ۱۴۰۳ به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی با سه تکرار بر روی جوانه زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل عصاره آبی سانهمپ (در غلظت‌های صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر) و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سانهمپ (نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بدون عصاره، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر عصاره آبی سانهمپ) بود. سنتز سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با سانهمپ در مقایسه با عصاره آبی سانهمپ در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر سبب کاهش ۳۰/۵۶ و ۴۳/۰۱ درصدی جوانه زنی بذر تاج خروس شد. این مطالعه نشان داد که نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره سانهمپ در مقایسه با عصاره آبی سانهمپ سبب افزایش ۱/۲۰ و ۱۲/۶۳ درصدی پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش ۳/۸۴ و ۵۲/۷۲ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر گردید. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده بازدارندگی بالای سنتز سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سانهمپ بر جوانه زنی و مؤلفه‌های وابسته به آن در بذر تاج خروس ریشه قرمز است.

نحوه استناد به این مقاله:

Ebadi, A., Ahmadnia, F., & Feizpoor, S. (2026). The effect of green synthesis of titanium dioxide nanoparticles with Sunn hemp (*Crotalaria juncae*) aqueous extract on the germination of Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) seed. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 14(4), 79-96. <https://doi.org/10.22092/ijssst.2025.367299.1544>

مقدمه

علف‌های هرز از محدودیت‌های مهم زیستی در سیستم‌های کشاورزی بوده؛ به‌طوری که عملکرد محصولات کشاورزی را تا حدود ۳۴ درصد کاهش می‌دهند (Chauhan & Gill, 2014; Nusrat et al., 2018). تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) علف‌هرزی یکساله، دو لپه‌ای با مسیر فتوسنتزی چهار کربنه از خانواده *Amaranthaceae* است (Qi et al., 2017). این گیاه سومین علف‌هرز رایج در جهان بوده و در ۷۰ کشور گرمسیری و نیمه گرمسیری گسترش یافته است (Enayati et al., 2019). بذر علف‌هرز تاج خروس قابلیت ماندگاری بالایی (شش الی ۱۰ سال) را در خاک داشته و به‌دلیل رشد تهاجمی، قدرت رقابتی بالایی با گیاهان زراعی برای دستیابی به آب، نور و عناصر غذایی را دارد (Costea et al., 2004; Cristaudo et al., 2006; Vangessel & Renner, 1990).

اگرچه امروزه استفاده از علفکش‌های شیمیایی یکی از روش‌های کنترل علف‌های هرز است، اما به‌دلیل افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر و بروز پدیده مقاومت در علف‌های هرز، حامیان محیط زیست تأکید بیشتری بر کاهش مصرف غیرهدفمند علفکش‌های شیمیایی در اکوسیستم‌های کشاورزی دارند. استفاده از ویژگی دگرآسیبی برخی از گیاهان به عنوان یکی از روش‌های زیستی کنترل و یا دست‌کم کاهش جمعیت علف‌های هرز در مزارع کشاورزی شناخته شده است (Ahmadnia et al., 2023a; Sharma & Satsangi, 2013). ترکیبات آللوپاتی می‌توانند توسط برخی گیاهی در حال رشد به محیط آزاد شده و یا به‌طور غیرفعال در طی تجزیه بقایای گیاهی تولید شوند (Bais et al., 2006; Sahoo et al., 2023). بیشتر این ترکیبات متابولیت‌های ثانویه هستند که به ترپنوئیدها، ترکیبات فنلی، اسیدهای چرب با زنجیره بلند، سیانیدهای آلی، آلکالوئیدها و غیره تعلق دارند (Macias et al., 2019) و می‌توانند در هر قسمتی از گیاه مانند ساقه، ریشه، گل و بذر یافت شوند (Ahmadnia et al., 2022). ترکیبات دگرآسیب در خاک قابلیت اثر بر رشد گیاهچه (Rigon et al., 2018)، تجمع ماده خشک

(Muhammad et al., 2014)، فتوسنتز (Pula et al., 2020)، تنفس و تقسیم سلولی، سنتز رنگدانه‌ها، تولید هورمون‌های گیاهی و فعالیت‌های آنزیمی را دارند (Nivas et al., 2017). سان همپ (*Crotalaria juncea*) گیاه گرمسیری و نیمه گرمسیری از خانواده *Fabaceae* است (Ahmadnia et al., 2023a; Kamireddy et al., 2013; 2025)، که بومی کشورهای آمریکا، برزیل، هند، بنگلادش، چین، کره و پاکستان بوده و بیشتر به عنوان یک گیاه پوششی فصل کوتاه با هدف تولید الیاف، کود سبز، مصارف دارویی و کنترل علف‌های هرز در تناوب‌های زراعی کشت می‌شود (Cho et al., 2015; Garzon et al., 2020; Parenti et al., 2021; Skinner et al., 2012). برخی از مطالعات به خاصیت دگرآسیبی قوی سان همپ و اثر آن بر کاهش یا توقف جوانه‌زنی برخی از بذرها اشاره کرده‌اند (Ahmadnia et al., 2022; Skinner et al., 2012; 2023a). برای مثال گزارش شده که ترکیبات دگرآسیب جداسازی شده از سان همپ گونه کروتالاریا^۱ شامل اسید آمینه غیر پروتئینی هیدروکسی نورولوسین^۲ و طیف وسیعی از آلکالوئیدهای دهیدروپیرولیزیدین^۳ است که سبب مهار جوانه‌زنی برخی از علف‌های هرز می‌شود (Colegate et al., 2012; Javaid et al., 2012). با این حال ناپایداری ترکیبات دگرآسیب در محیط یکی از دلایل اصلی ارتقاء آن‌ها با نانوذرات به‌منظور کنترل هدفمند جوانه‌زنی علف‌های هرز است.

سنتز سبز نانوذرات با عصاره‌های گیاهان دگرآسیب یکی از روش‌های ایمن و سازگار با محیط زیست است که از جمله فواید آن می‌توان به اجتناب از کاربرد مواد شیمیایی خطرناک، غیرسمی و دوستدار محیط زیست، آماده‌سازی آسان و مقرون به صرفه اشاره کرد (Ahmadnia et al., 2022; Salvadori et al., 2014). نانوذرات در کشاورزی بیشتر به‌منظور کاهش انتشار مواد شیمیایی، هدررفت علفکش‌ها و آفت‌کش‌ها استفاده می‌شوند (Choudhary et al., 2020). دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) یک اکسید معدنی غیرسیلیکاتی است که به شکل‌های آناتاز، روتیل و بروکایت در طبیعت یافت می‌شود (Sant'as-Miguela et al., 2023) و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد

¹ *Crotalaria*² Hydroxynorleucine³ Dehydropyrrolizidine

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان با مختصات جغرافیایی (48° 20' E, 38° 19' N) کشت گردید. نتایج تجزیه خاک مزرعه آزمایشی در جدول دو ارائه شده است. هیچگونه کوددهی، مبارزه با آفات و بیماری‌ها و علف‌های هرز اعمال نگردید. آبیاری براساس شرایط اقلیمی منطقه چهار الی شش روز یک بار انجام شد. برگ‌های سان‌همپ با گذشت ۱۰۰ روز از تاریخ کاشت جمع‌آوری و به مدت ۷۲ ساعت تا حصول وزن ثابت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و آسیاب شدند (Ahmadnia et al., 2023; Skinner et al., 2012). برای تهیه عصاره آبی گیاه سان‌همپ از روش خیساندن^۱ استفاده شد (Ahmadnia et al., 2025; Trusheva et al., 2007)، که در این روش براساس غلظت‌های آزمایشی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم پودر برگ سان‌همپ به یک لیتر آب مقطر اضافه شد (Sakadoz et al., 2018). محلول‌های حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد بر روی شیکر مدل (FSA, AC220V, 50/60HZ (IRAN) قرار گرفت. سپس محلول‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف گردید و به مدت ۱۵ دقیقه با ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و عصاره شفاف رویی جدا و تا زمان انجام آزمون‌های زیست‌سنجی در یخچال در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

سنتر سبز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم: برای سنتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، محلول تیتانیوم تترا ایزوپروپوکساید (TTIP) از شرکت مرک^۲ با خلوص ۹۸ درصد تهیه شد. سنتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با استفاده از روش سل ژل انجام شد (Ebadi et al., 2025). شناسایی نوع پیوندها و ترکیبات شیمیایی موجود در نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتر شده با استفاده از دستگاه FTIR (Perkin Elmer Spectrum RX I) دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ انجام شد. برای تعیین خواص حرارتی و مغناطیسی نانوذرات از تجزیه ترموگراویمتری^۳ (TGA, LINSEIS STA PT-1000) استفاده شد. همچنین ساختار کریستالی نانوذرات توسط پراش اشعه ایکس^۴ (XRD, Philips Xpert diffractometer) تجزیه شد. تصویربرداری از شکل

(Grand & Tucci, 2016). همچنین از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم برای بهبود شرایط خاک و رشد گیاهان در تنش‌های محیطی استفاده می‌شود (Fatima et al., 2021). اهمیت ارائه روش‌های سازگار با محیط زیست برای کنترل یا کاهش جوانه‌زنی و رشد و استقرار علف‌های هرز در سیستم‌های کشاورزی سبب اجرای پژوهشی با عنوان اثر سنتر سبز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان‌همپ (*Crotalaria juncea*) بر جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) شد. هدف‌های اصلی این مطالعه، بررسی اثر عصاره آبی سان‌همپ و سنتر سبز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان‌همپ در غلظت‌های مختلف بر جوانه‌زنی، شاخص‌های طولی و وزنی و فعالیت‌های فیزیولوژیک بذر و گیاهچه تاج خروس ریشه قرمز بود. همچنین مقایسه اثر تیمارها برای تعیین درصد کاهش و توقف کامل جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز مورد توجه بود. فرضیه اصلی این مطالعه بر این اساس بود که افزایش غلظت عصاره آبی سان‌همپ در سنتر سبز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به کاهش قابل توجهی در جوانه‌زنی بذر در مقایسه با عصاره آبی سان‌همپ خواهد شد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایش: آزمایش در بهار سال ۱۴۰۳ برای بررسی اثر عصاره آبی سان‌همپ و سنتر سبز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان‌همپ (*Crotalaria juncea*) بر جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) در آزمایشگاه‌های تکنولوژی بذر و علوم علف‌های هرز گروه آموزشی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی به شرح جدول یک می‌باشند. بذر سان‌همپ با نام تجاری (*Crotalaria Juncea*) Global Sunn brand Sunn hemp در سال ۱۳۹۶ از ایالت ماساچوست آمریکا تهیه شد. بذرهای پس از اختلاط با باکتری همزیست *Bradyrhizobium leguminosarum* با فواصل بین و روی ردیف ۳۸ و ۱۰ سانتی‌متر (Ahmadnia et al., 2020) در بهار سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی

¹ Maceration

² Merck

³ Thermogravimetric

⁴ X-ray Diffraction

ساختار نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM, LEO 1430VP انجام گردید.

جدول ۱- تیمارهای آزمایشی

Table 1- Experimental treatments

تیمارها Treatments	غلظت‌ها Concentration
	غلظت صفر (آب مقطر) 0 concentration (distilled water)
	غلظت ۱۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ 10 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract
عصاره آبی سان‌همپ Sunn hemp aqueous extract	غلظت ۱۵ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ 15 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract
	غلظت ۲۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ 20 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract
	نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بدون عصاره آبی سان‌همپ TiO ₂ NPs without Sunn hemp aqueous extract
	نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۱۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ Synthesized TiO ₂ NPs with a 10 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract
نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ Titanium dioxide nanoparticles (TiO ₂ NPs) synthesized with Sunn hemp aqueous extract	نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۱۵ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ Synthesized TiO ₂ NPs with a 15 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract
	نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۲۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ Synthesized TiO ₂ NPs with a 20 g/L ⁻¹ concentration of Sunn hemp aqueous extract

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک مزرعه آزمایشی

Table 2- Some characteristics of the experimental soil

پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium	میلی گرم در کیلوگرم mg/kg	467
فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus		10.51
نیتروژن کل (کج‌لدال) Total nitrogen (Kjeldal)		0.05
کربن آلی Organic carbon	درصد (%)	0.6
کربنات کلسیم Calcium carbonate		31.2
بافت خاک Soil texture	-	Clay
رس Clay		59.08
سیلت Silt	درصد (%)	30
شن Sand		10.92
EC	دسی زیمنس بر متر (dS/m)	4.7
pH	-	7.8

آزمون زیست سنجی: بذر تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthos retroflexus*) از مزارع مغان (۳۹°۳۱' شمالی و ۴۶°۴۷' شرقی) در تابستان سال ۱۴۰۲ جمع آوری شد. قوه نامیه بذر علف هرز تاج خروس ریشه قرمز مورد ارزیابی قرار گرفت و برای شکست خواب بذر از جیبرلیک اسید با غلظت ۱۵۰۰ میلی گرم در لیتر با ۲۴ ساعت نگهداری در تاریکی استفاده شد (Ahmadnia et al., 2023b). برای بررسی اثر عصاره آبی سان همپ و سنتر سبز آن با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم تعداد ۵۰ عدد بذر از علف هرز تاج خروس ریشه قرمز پس از استریل سطحی توسط هیپوکلریت سدیم یک درصد به صورت تصادفی در پتری دیش های به قطر نه سانتی متر روی کاغذ صافی قرار داده شدند. به هریک از پتری دیش ها ۱۰ میلی لیتر از تیمارها افزوده شد. پس از آن ظروف پتری دیش در پاکت های پلاستیکی شفاف قرار داده شد و به منظور جوانه زنی به ژرminatور با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انتقال داده شد. شمارش بذرها به مدت ۱۴ روز ادامه یافت. بذرهایی با طول ریشه چه دو میلی متر به عنوان بذرهایی جوانه زده در نظر گرفته شدند (Perry, 1991). طول ساقه چه و طول ریشه چه پس از اتمام دوره جوانه زنی با استفاده از خط کش

اندازه گیری شدند. همچنین درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی، ضریب سرعت جوانه زنی، میانگین زمان جوانه زنی و درصد کاهش صفات مورد بررسی براساس روابط جدول ۳ محاسبه شدند.

فعالیت آنزیم کاتالاز: برای اندازه گیری فعالیت آنزیم کاتالاز ۰/۲ گرم نمونه تازه از بافت گیاهیچه حاصل از بذرهایی جوانه زده در مجاورت نیتروژن مایع پودر شده و با یک میلی لیتر بافر تریس-کلریدریک ۰/۵۰ مولار با اسیدیت ۷/۵ هموزن گردید. همگنای حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی گراد با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و محلول شفاف رویی برای اندازه گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده شد. سپس ۲/۵ میلی لیتر بافر تریس (۵۰ میلی مولار، اسیدیت هفت) و ۰/۳ میلی لیتر آب اکسیژنه (پنج میلی مولار) تهیه شده و ۶۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی در حمام یخ به آن اضافه شد. میزان تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV 2100 ساخت آمریکا قرائت شد. برای نمونه شاهد از بافر تریس-کلریدریک ۰/۵۰ مولار استفاده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز براساس تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه محاسبه شد (Sudhakar et al., 2001).

جدول ۳- آزمون های زیست سنجی بذر تاج خروس ریشه قرمز تحت تأثیر تیمارها و غلظت ها

Table 3- Bioassay of Redroot pigweed seeds under the influenced by treatments and its concentrations

صفات مورد بررسی	معادلات	منابع
Traits under investigation	Equation	Reference
درصد جوانه زنی	$GP = \frac{S}{T} \times 100$	Scott et al., 1984
Germination percentage		
سرعت جوانه زنی	$GS = \sum \frac{n}{t}$	Maguire, 1962
Germination rate		
ضریب سرعت جوانه زنی	$CVG = \frac{\sum Gt}{\sum GT \times Tt}$	Baiyeri et al., 2011
Coefficient of velocity of germination		
میانگین زمان جوانه زنی	$MGT = \frac{\sum(nd)}{\sum n}$	Ellis, 1992
Mean germination time		
درصد کاهش	$PR = \frac{(x - y)}{x} \times 100$	Ahmadnia et al., 2023a
Percentage reduction		

در این روابط GP بیانگر درصد جوانه زنی، S بیانگر تعداد بذرهایی جوانه زده، T بیانگر تعداد کل بذرهایی نمونه، GS بیانگر سرعت جوانه زنی، n بیانگر تعداد بذر جوانه زده در زمان t، بیانگر تعداد روزهای پس از شروع جوانه زنی، CVG بیانگر ضریب سرعت جوانه زنی، Gt بیانگر تعداد بذرهایی جوانه زده در روز t، Tt بیانگر زمان متناظر برای Gt در روزها، MGT بیانگر میانگین زمان جوانه زنی، $\sum(nd)$ بیانگر تعداد بذر جوانه زده در d روز، d بیانگر تعداد روز، PR بیانگر درصد کاهش صفات مورد بررسی، X بیانگر نتایج در تیمار شاهد، Y بیانگر نتایج صفت مورد نظر در تیمارها یا غلظت ها می باشد.

In these equations, GP stands for germination percentage, S is the number of germinated seeds, T is the total number of seeds in the sample, GS represents the germination rate, n is the number of seeds germinated at time t, t indicates the number of days after the start of germination, CVG is the coefficient of velocity of germination, Gt is the number of seeds germinated on day t, and Tt is the corresponding time in days for Gt. MGT denotes mean germination time, $\sum(nd)$ indicates the total number of seeds germinated over d days, where d is the number of days. PR reflects the percentage reduction of the studied traits, X shows the results in the control treatment, and Y represents the results for the desired trait in the treatments or concentrations.

در 1636 cm^{-1} متعلق به ارتعاش کششی گروه $\text{C}=\text{C}$ می باشد (Mahiuddin et al., 2020).

تجزیه پراش اشعه ایکس: تجزیه پراش اشعه ایکس برای بدست آوردن اطلاعاتی در مورد خلوص و ساختار کریستالی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم خالص و دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره گیاه سان همپ مورد مطالعه قرار گرفت. الگوهای پراش اشعه ایکس نانوذرات تهیه شده در شکل (۱ c و d) مشاهده می شود. پیک های مشخصه در $25/5^\circ$ ، 38° ، $48/2^\circ$ ، $54/1^\circ$ ، $55/3^\circ$ ، 63° ، 69° و $70/6^\circ$ به ترتیب به صفحات کریستالی (۱۰۱)، (۰۰۴)، (۲۰۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۲۰۴)، (۱۱۶)، (۲۲۰)، (۲۱۵) فاز آناتاز و پیک مشخصه در $27/8^\circ$ به صفحه کریستالی (۱۱۰) فاز روتایل دی اکسید تیتانیوم نسبت داده می شوند. پیک های پراش مطابق با ساختار تتراگونال دی اکسید تیتانیوم و ترکیبی از فاز آناتاز با شماره مرجع ۰۴۷۷-۰۰۰۴ و فاز روتایل با شماره مرجع ۰۱۱۷۳-۰۰۸۸ هستند (Khandekar et al., 2021; Wang et al., 2020). عدم مشاهده پیک ناخالصی در الگوهای نانوذرات، خلوص بالای نانوذرات سنتز شده را به وضوح نشان می دهد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بدون عصاره گیاهی و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با افزودن غلظت های مختلف عصاره آبی سان همپ دارای ساختار کروی هستند (شکل ۲ a-d).

تجزیه گرماسنجی حرارتی: پایداری حرارتی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و دی اکسید تیتانیوم تهیه شده با عصاره سان همپ، توسط تجزیه گرماسنجی حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱ e و f). نتایج حاصل از تجزیه گرماسنجی حرارتی پایداری حرارتی بالای نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره گیاه سان همپ را تأیید می کند.

آزمون های زیست سنجی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش تیمارها با غلظت ها بر درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی، میانگین زمان جوانه زنی، ضریب سرعت جوانه زنی، طول ریشه چه و طول ساقه چه معنی دار بود (جدول ۴).

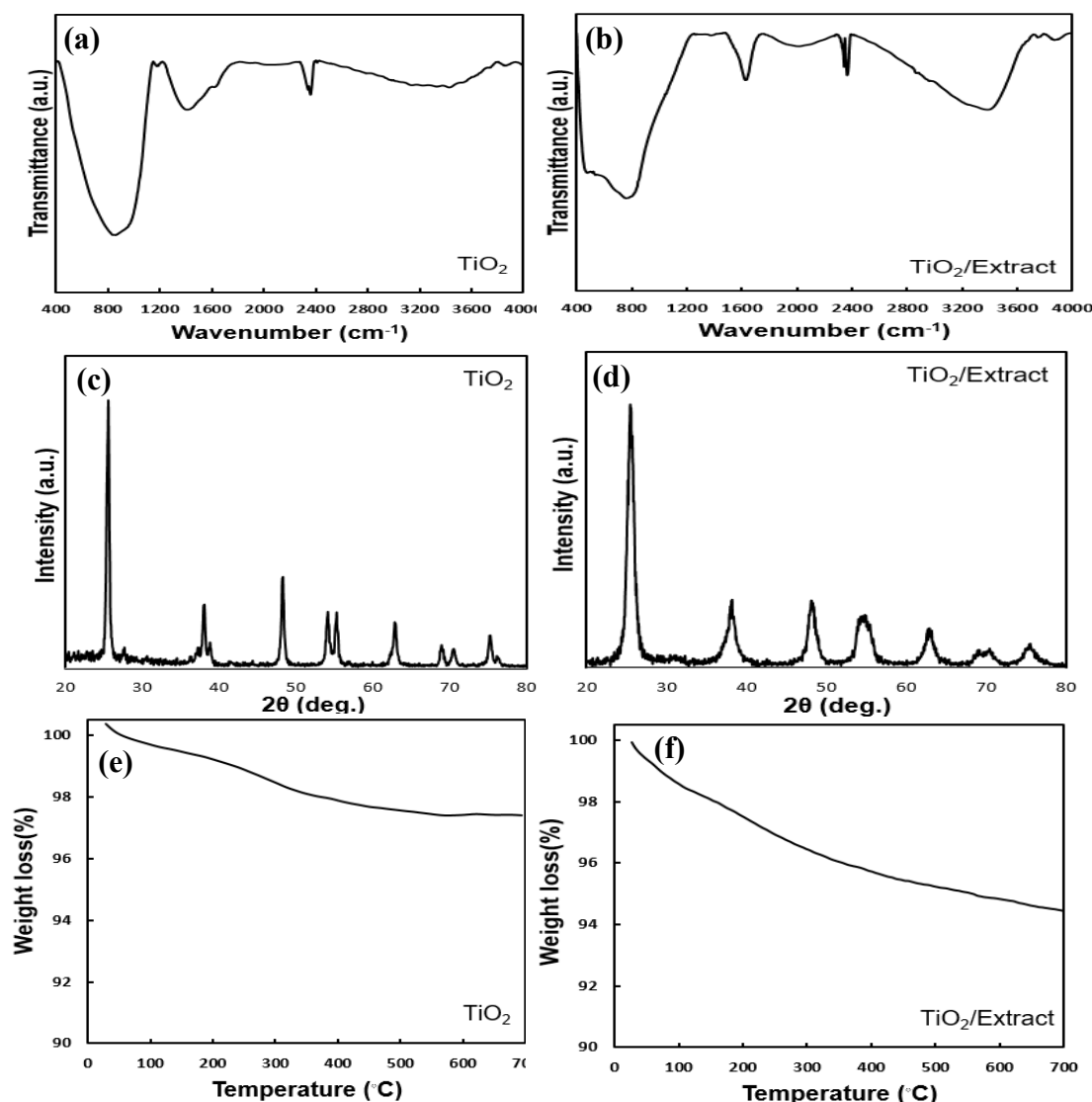
پراکسیداسیون لیپیدی: حدود ۰/۵ گرم از گیاهچه تاج خروس ریشه قرمز در ۱۰ میلی لیتر محلول ۰/۱ درصد تری کلرواستیک اسید همگن و به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. دو میلی لیتر از محلول روشناور حاصل با چهار میلی لیتر از محلول ۲۰ درصد تری کلرواستیک اسید محتوی ۰/۵ درصد تیوباربتوریک اسید مخلوط شد. کمپلکس حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد نگهداری و سپس به حمام آب سرد منتقل شد. سپس نمونه ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. میزان تغییرات جذب در طول موج های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل UV 2100 ساخت آمریکا قرائت شد (Stewart & Bewley, 1980).

تجزیه آماری: تجزیه آماری با استفاده از نرم افزار SAS9.4، مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون LSD5% و ترسیم شکل ها با استفاده از نرم افزار Excel2019 انجام شد. نتایج طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ، پراش اشعه ایکس و گرماسنجی حرارتی با نرم افزار Origin2022 ترسیم شدند. لازم به ذکر است که نتایج آزمون نرمال بودن کولموگرووف-اسمیرنوف^۱ نشان داد که صفات طول ریشه چه و ساقه چه دارای توزیع نرمالی بودند. سایر صفات براساس نتایج تجزیه واریانس و معنی دار تیمارهای آزمایشی نرمال سازی نشده اند.

نتایج

تجزیه طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ: آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ در مورد ساختار شیمیایی و گروه های عاملی موجود در نمونه های سنتز شده، به کار گرفته شد که نتایج حاصل از آن در شکل (۱ a و b) ارائه شده است. در طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره گیاه سان همپ، پیک های جذبی پهن در ناحیه $500-800 \text{ cm}^{-1}$ و $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی گروه های $\text{O}-\text{H}$ و $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ می باشد (Pham et al., 2021; Yuan et al., 2021). برای نانوذره دی اکسید تیتانیوم تهیه شده با عصاره گیاه سان همپ، پیک جذبی

¹ Kolmogorov-Smirnov



شکل ۱- طیف‌های تبدیل فوریه فروسرخ (a و b)، پراش اشعه ایکس (c و d) و گرماسنجی حرارتی (e و f)

Figure 1- Fourier Transform Infrared Spectroscopy (a and b), X-ray Diffraction (c and d) and Thermogravimetric (e and f)

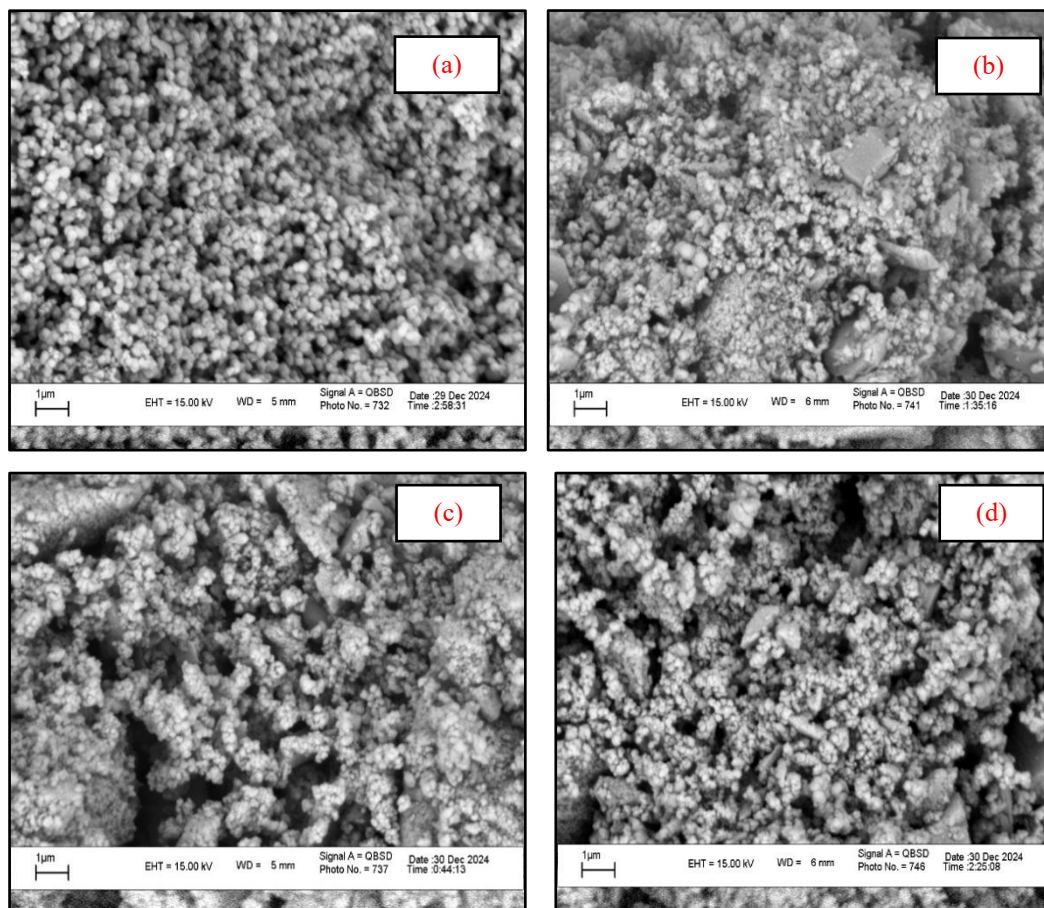
۳۸/۰۰، ۱۰۰/۰۰، ۳۲/۸۹، ۶۴/۴۳ و ۱۰۰/۰۰ درصدی جوانه‌زنی بذر تاج‌خروس ریشه قرمز شدند (جدول ۵). توقف جوانه‌زنی بذر تاج‌خروس ریشه قرمز سبب کاهش ۱۰۰ درصدی سرعت جوانه‌زنی بذر در غلظت ۲۰ گرم در لیتر هر دو تیمار شد (جدول ۵). سرعت جوانه‌زنی بذر متأثر از درصد جوانه‌زنی بذر با افزایش غلظت در تیمارها کاهش یافت. نتایج مقایسه میانگین در جدول ۵ نشان می‌دهد که غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر در مقایسه با تیمارهای شاهد در عصاره آبی سان‌همپ (۶/۱۷، ۳۵/۱۹ و ۱۰۰/۰۰ درصد) و در نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با

درصد و سرعت جوانه‌زنی: نتایج نشان داد که غلظت ۲۰

گرم در لیتر هر دو تیمار منجر به توقف جوانه‌زنی بذر تاج‌خروس ریشه قرمز گردید. کمترین درصد جوانه‌زنی $35/33 \pm 1/13$ درصد) پس از غلظت ۲۰ گرم در لیتر، از غلظت ۱۵ گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج حاکی از اثر افزایش غلظت‌ها بر کاهش درصد جوانه‌زنی بود، به‌طوری که غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر در عصاره آبی سان‌همپ و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ منجر به کاهش ۳/۶۷،

عصاره آبی سان‌همپ در کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز بود (جدول ۵).

عصاره آبی سان‌همپ (۲۷/۰۲، ۶۴/۷۲ و ۱۰۰/۰۰ درصد) سرعت جوانه‌زنی بذر را کاهش دادند (جدول ۴). مقایسه عصاره‌های گیاهی نشان‌دهنده برتری نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بدون عصاره سان‌همپ (a)،

دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۱۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ (b)، دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۱۵ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ (c) و دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با غلظت ۲۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ (d)

Figure 2- Scanning Electron Microscope of TiO_2 NPs without Sunn hemp extract (a); TiO_2 synthesized with a concentration of 10 g/L of Sunn hemp aqueous extract (b); TiO_2 synthesized with a concentration of 15 g/L of Sunn hemp aqueous extract (c); and TiO_2 synthesized with a concentration of 20 g/L of Sunn hemp aqueous extract (d)

بیانگر افزایش ضریب سرعت جوانه‌زنی بذر تاج‌خروس ریشه قرمز در نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ در مقایسه با عصاره آبی سان‌همپ در تمام غلظت‌ها بود؛ به‌طوری که این شاخص در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ به ترتیب ۲۳/۴۱ و ۶/۴۸ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان‌دهنده کاهش ضریب سرعت جوانه‌زنی بذر تاج‌خروس ریشه قرمز با افزایش غلظت در هر دو تیمار بود (جدول ۵).

میانگین زمان جوانه‌زنی بذر: مقدار این شاخص در

نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ کمتر از عصاره آبی سان‌همپ در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر بود. نتایج مقایسه تیمارها نشان داد که نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ در مقایسه با عصاره آبی سان‌همپ در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر منجر به کاهش ۲۳/۱۹ و ۶/۵۵ درصدی میانگین زمان جوانه‌زنی بذر شد (جدول ۵).

ضریب سرعت جوانه‌زنی بذر: نتایج مقایسه میانگین‌ها

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر عصاره آبی سان همپ و نانوذرات TiO_2 سنتز شده با عصاره آبی سان همپ بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز
Table 4- The analysis of variance of Sunn hemp aqueous extract and TiO_2 NPs synthesized with Sunn hemp aqueous extract on the Redroot pigweed seed germination indices

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean germination time	ضریب سرعت جوانه‌زنی Coefficient of velocity of germination	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Plumule length
تیمارها Treatments (T)	1	1204.16**	13.37**	0.46**	150.67**	0.12*	1.08**
غلظت‌ها Concentration (C)	3	11460.61**	545.01**	8.57**	2688.08**	14.56**	51.33**
تیمارها × غلظت‌ها (T) × (C)	3	384.61**	15.77**	0.10**	36.72**	0.16**	0.71**
خطای آزمایشی Error	16	3.50	0.38	0.003	1.19	0.01	0.07
ضریب تغییرات (درصد) Coeff Var (%)	-	3.25	4.91	3.40	3.44	7.71	7.95

** و * به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

** and * are significantly differences at 1% and 5%, respectively.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش تیمارها با غلظت‌ها بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر تاج خروس ریشه قرمز

Table 5- The mean comparing of the treatments and concentrations on Redroot pigweed seed germination indices

تیمارها Treatments	غلظت‌ها (گرم در لیتر) Concentrations (g/L ⁻¹)	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی (بذر/روز) Germination rate (Seed/day)	میانگین زمان جوانه‌زنی (روز) Mean germination time (Day)	ضریب سرعت جوانه‌زنی Coefficient of velocity of germination	طول ریشه‌چه (سانتی متر) Radicle length (cm)	طول ساقه‌چه (سانتی متر) Plumule length (cm)
عصاره آبی سان همپ Sunn hemp aqueous extract	0	100.00±0.00 ^a	20.57±0.27 ^b	2.64±0.05 ^a	37.88±0.75 ^d	3.46±0.15 ^a	7.23±0.25 ^a
	10	96.00±2.00 ^b	19.30±0.17 ^c	2.63±0.03 ^a	37.90±0.56 ^d	2.73±0.15 ^b	4.16±0.15 ^c
	15	62.00±2.00 ^d	13.33±0.71 ^e	2.44±0.06 ^b	40.96±1.06 ^e	1.10±0.10 ^d	3.33±0.41 ^d
	20	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^g	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f
نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ TiO_2 NPs synthesized with Sunn hemp aqueous extract	0	99.33±1.15 ^a	22.68±1.00 ^a	2.30±0.12 ^c	43.51±2.39 ^b	3.63±0.25 ^a	6.73±0.05 ^b
	10	66.66±4.16 ^c	16.55±1.10 ^d	2.02±0.01 ^d	49.49±0.43 ^a	2.13±0.15 ^c	4.33±0.56 ^c
	15	35.33±1.13 ^e	8.00±0.44 ^f	2.28±0.06 ^c	43.80±1.25 ^b	0.96±0.05 ^d	1.96±0.15 ^e
	20	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^g	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^e	0.00±0.00 ^f
LSD _{5%}	-	2.91	0.95	0.10	1.80	0.23	0.47

میانگین‌های با حروف مشترک، تفاوت آماری معنی داری با یکدیگر در آزمون LSD_{5%} ندارند.

The means with same letters do not have a statistically significant difference with each other in the LSD_{5%} test.

نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ در غلظت های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر منجر به کاهش به ترتیب ۴۲/۳۹، ۵۳/۹۱، ۱۰۰/۰۰، ۳۵/۶۴ و ۷۰/۷۹ و ۱۰۰/۰۰ درصدی طول ساقه چه تاج خروس ریشه قرمز شدند (جدول ۵).

پراکسیداسیون لیپیدی: اثر برهمکنش تیمارها با غلظت ها بر پراکسیداسیون لیپیدی در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (جدول ۶). افزایش غلظت در تیمارها منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدی در تاج خروس ریشه قرمز شد؛ به طوری که بیشترین میزان پراکسیداسیون لیپیدی 0.17 ± 0.51 میکرومول بر گرم وزن تر) در غلظت ۱۵ گرم در لیتر نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ و کمترین آن در تیمارهای شاهد (آب مقطر و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بدون عصاره) به ترتیب 0.04 ± 0.36 و 0.07 ± 0.37 میکرومول بر گرم وزن تر ثبت شد (شکل ۳). نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ در مقایسه با عصاره آبی سان همپ سبب افزایش ۱/۲۰ و ۱۲/۶۳ درصدی پراکسیداسیون لیپیدی در غلظت های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر گردید (شکل ۳).

طول ریشه چه و ساقه چه: افزایش غلظت در تیمارها منجر

به کاهش معنی داری طول ریشه چه شد. غلظت های ۲۰ گرم در لیتر در هر دو تیمار، به دلیل توقف کامل جوانه زنی بذر تاج خروس فاقد طول ریشه چه و ساقه چه بود. پس از آن، کمترین طول ریشه چه در ۱۵ گرم در لیتر عصاره آبی سان همپ و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ (به ترتیب 0.96 ± 0.10 و 1.10 ± 0.10 سانتی متر) به دست آمد (جدول ۵). همچنین نتایج نشان داد که غلظت های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر در عصاره آبی سان همپ و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ در مقایسه با تیمارهای شاهد منجر به کاهش به ترتیب ۲۱/۱۵، ۶۸/۲۶، ۱۰۰/۰۰، ۴۱/۲۸، ۷۳/۳۹ و ۱۰۰/۰۰ درصدی طول ریشه چه تاج خروس ریشه قرمز شدند (جدول ۵). طول ساقه چه متأثر از درصد جوانه زنی و ظهور ریشه چه در شاهد (آب مقطر) بیشترین مقدار 0.25 ± 0.73 سانتی متر) را داشت. همچنین کمترین طول ریشه چه 0.15 ± 0.96 سانتی متر) متعلق به غلظت ۱۵ گرم در لیتر نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان همپ بود (جدول ۵).

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر برهمکنش تیمارها با غلظت ها بر فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداسیون لیپیدی گیاهچه تاج خروس ریشه قرمز

Table 6- The analysis of variance of the interaction effect of treatments and concentrations on the catalase enzyme activity and lipid peroxidation of Redroot pigweed seedlings

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme activity	پراکسیداسیون لیپیدی Lipid peroxidation
تیمارها Treatments (T)	1	9.777**	0.0020*
غلظت ها Concentration (C)	3	5105.720**	0.2797**
تیمارها × غلظت ها (T) × (C)	3	2.901*	0.0014*
خطای آزمایشی Error	16	0.78	0.0003
ضریب تغییرات (درصد) Coeff Var (%)	-	2.09	5.73

** و * به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک و پنج درصد می باشد.

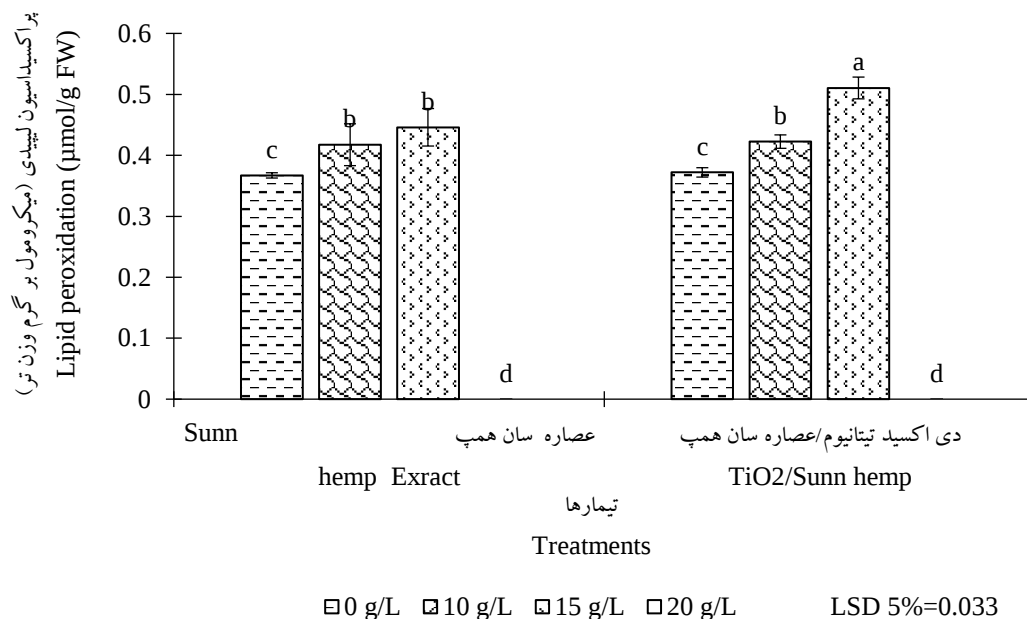
** and * are significantly differences at 1% and 5%, respectively.

تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) و کمترین آن $0.29 \pm 44/99$ تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در غلظت ۱۵ گرم در لیتر سنتز سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان همپ ثبت شد (شکل ۴). فعالیت آنزیم کاتالاز

فعالیت آنزیم کاتالاز: فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تأثیر

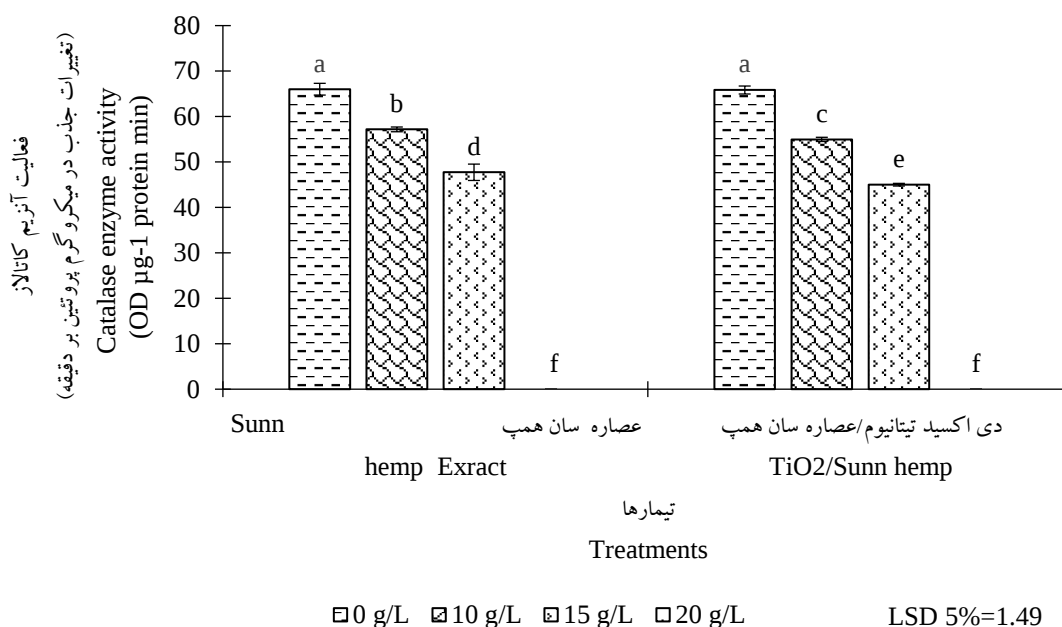
برهمکنش تیمارها با غلظت ها در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (جدول ۶). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمارهای شاهد (به ترتیب 1.29 ± 0.66 و 0.87 ± 0.65

در سنتر سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان همپ در مقایسه با عصاره آبی سان همپ در غلظت های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر به ترتیب ۳/۸۴ و ۵/۷۲ درصد کاهش یافت (شکل ۴).



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش نوع عصاره و غلظت بر پراکسیداسیون لیپیدی در تاج خروس ریشه قرمز

Figure 3- Mean comparing of extract type and concentration interaction on lipid peroxidation of redroot pigweed



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش نوع عصاره و غلظت بر فعالیت آنزیم کاتالاز در تاج خروس ریشه قرمز

Figure 4- Mean comparing of catalase enzyme activity interaction as affected by extract type and concentration on catalase enzyme activity in redroot pigweed

بحث

تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) از مهمترین علف‌های هرز خسارت‌زا در محصولات کشاورزی مختلف است که آثار سوء آن بر بسیاری از محصولات کشاورزی گزارش شده است (Ahmadnia et al., 2023a). نتایج این آزمایش نشان داد که عصاره آبی سان‌همپ و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره آبی سان‌همپ منجر به کاهش و توقف کامل جوانه‌زنی بذر علف‌هرز تاج‌خروس ریشه قرمز می‌شود؛ به‌طوری که در غلظت‌های ۲۰ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ و سنتز سبز آن با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم توقف کامل جوانه‌زنی بذر مشاهده شد. افزایش غلظت در تیمارها از مهمترین عوامل کاهش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و شاخص‌های طولی از جمله طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه بود. اثرات دگرآسیبی عصاره یک گونه گیاهی به مقدار و نوع ترکیبات آللوپاتی‌های آن و غلظت وابسته است (Janusauskaite, 2023; Nafees et al., 2021). گزارش شده است که سان‌همپ گیاهی دگرآسیب بوده و حاوی ترکیبات شناسایی شده از جمله آلکالوئیدهای دهیدروپیرولیزیدین جونسنین^۱، تریکودزمین^۲، ایزوهمی جونسنین‌های A^۳، B^۴ و C^۵ و استیلیزوهمی جونسنین^۶ و II^۷ می‌باشد (Colegate et al., 2012). بیان شده است که ریدلین^۸، سنکونین^۹ و سنسیفیلین^{۱۰} برخی دیگر از آلکالوئیدهای موجود در سان‌همپ وجود دارند که می‌تواند در سرکوب دگرآسیب علف‌های هرز مؤثر باشند (Morris et al., 2015). در مطالعه‌ای نتایج حاصل از کروماتوگرافی گازی عصاره سان‌همپ بیانگر شناسایی ترکیبات غالب نانودکان^{۱۱} (۱۰۵/۸ میلی گرم بر گرم)، هنیکوزان^{۱۲} (۵۸/۱ میلی گرم بر گرم)، پنتادکانون^{۱۳} (۶،۱۴، ۱۰-تری متیل^{۱۴} ۳/۳)

میلی گرم بر گرم)، هپتادکان^{۱۱} (۳۱/۸ میلی گرم بر گرم)، تری آلیل سیلان^{۱۲} (۳۳/۷ میلی گرم بر گرم)، فیتول^{۱۳} (۳۹/۵ میلی گرم بر گرم) و کروتونیک اسید منتیل استر^{۱۴} (۳۵/۴ میلی گرم بر گرم) در عصاره سان‌همپ بود (Ahmadnia et al., 2023a). اثر عصاره آبی سان‌همپ بر کنترل جوانه‌زنی خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) گزارش شده است (Ahmadnia et al., 2023a). در بررسی اثر عصاره سان‌همپ فرموله شده با نانوذرات کیتوزان بر جوانه‌زنی تاج خروس و خردل وحشی در غلظت‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم در لیتر با کاهش ۶، ۱۲، ۲۰ و ۴۴ درصدی گزارش شده است (Ahmadnia et al., 2022). همچنین در مطالعه دیگری گزارش شده است که عصاره حاصل از بقایای سان‌همپ جوانه‌زنی بذر کاهو و تاج خروس (*Amaranthus hybridus*) را کاهش می‌دهد (Skinner et al., 2012). افزایش غلظت عصاره سان‌همپ (۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر) در مقایسه با تیمار شاهد (آب مقطر) به ترتیب ۱۲/۰۵ و ۱۷/۶۹ درصد پراکسیداسیون لیپیدی را افزایش داد. این نتایج نشان‌دهنده تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن است که باعث افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب در غشاء پلاسمایی می‌گردد (Khan & Panda, 2009). بیان شده است که آللوپاتی منجر به کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تخریب غشاء سلولی می‌شوند (Mokhtari et al., 2014). همچنین فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر عصاره آبی سان‌همپ در مقایسه با شاهد (آب مقطر) ۱۳/۳۹ و ۲۷/۶۹ درصد کاهش یافت. کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز منجر به افزایش تخریب بیشتر غشاء سلولی می‌شود؛ که نتایج این آزمایش نشان‌دهنده اثر تیمارها بر افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز

¹ Junceine² Trichodesmine³ Isohemijunceines⁴ Acetylisohemijunceines⁵ Riddelline⁶ Senecionine⁷ Senecionine⁸ Nonadecane⁹ Heneicosane¹⁰ Pentadecanone, 6, 10,14-trimethyl¹¹ Heptadecane¹² Triallylsilane¹³ Phytol¹⁴ Crotonic acid, menthyl ester

آبی سان همپ اثرات بازدارندگی عصاره را بر روی جوانه زنی بذر تاج خروس در مقایسه با عصاره آبی سان همپ تشدید نمود. به نظر می رسد بخش عمده این اثرات افزایشی در جلوگیری از جوانه زنی بذرها و رشد اولیه علف هرز مربوط به اختلالاتی است که نانوذرات سنتز شده دی اکسید تیتانیوم با عصاره آبی سان همپ بر افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه های تاج خروس ریشه قرمز داشت. اگرچه نیاز به پژوهش های بیشتری برای تعیین اثر این گونه ترکیبات بر سایر فعالیت های فیزیولوژیک گیاهچه علف هرز تاج خروس ریشه قرمز وجود دارد، با این حال این مطالعه، بر استفاده از فناوری نانو، روش های ایمن و هدفمند برای کاهش جوانه زنی و استقرار علف های هرز تاکید دارد.

سیاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی مصوب ۱۴۰۳/۰۱/۲۵ در شورای پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی است. نویسندگان مقاله مراتب سپاسگزاری خود را از حمایت های مالی دانشگاه محقق اردبیلی، دوستان و همکارانی که در این طرح پژوهشی ما را یاری نمودند، اعلام می نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Ahmadnia, F., Alebrahim, M.T., Nabati Souha, L., & MacGregor, D.R. (2023b). Evaluation of techniques to break seed dormancy in Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*). *Food Science and Nutrition*, 12(4), 2334–2345. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3920>
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi M., & Nabati, L. (2020). Investigating the effectiveness of Sunn Hemp (*Crotalaria juncea*) and Rye (*Secale cereal L.*) in weed suppression and yield of Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *Gongylodes*). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 43–56. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13090> [In Persian]

بود. نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره سان همپ در مقایسه با عصاره آبی سان همپ بازدارندگی بیشتری بر شاخص های جوانه زنی و شاخص های طولی داشت. غلظت های ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر سنتز سبز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با عصاره سان همپ سبب کاهش درصد جوانه زنی، طول ریشه چه و ساقه چه و فعالیت آنزیم کاتالاز و افزایش پراکسیداسیون لیپیدی شده بود. بیان شده است که افزایش غلظت نانوذرات از طریق افزایش جذب آن ها توسط بذر و ایجاد اختلال در فرآیند جذب آب و فعالیت های متابولیکی سلول ها می تواند سبب سمیت و کاهش جوانه زنی بذر شود (Eskandarinasab et al., 2019). نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در غلظت های بالا می توانند اثرات سمی بر جوانه زنی و رشد گیاهان داشته باشند (Marslin et al., 2021; Romano de Melo, et al., 2017) که غالباً این اثرات به تولید رادیکال های آزاد اکسیژن نسبت داده می شوند (Marslin et al., 2017). رادیکال های آزاد اکسیژن می توانند باعث افزایش پراکسیداسیون لیپیدی شوند (Romano de Melo et al., 2021). همچنین رادیکال های آزاد اکسیژن می توانند بر ماکرومولکول هایی مانند اسیدهای نوکلئیک و پروتئین ها آسیب رسانده و منجر به اختلال در عملکرد غشاء، اندامک ها و مرگ سلول شوند (Dayem et al., 2017; Marslin et al., 2017; Romano de Melo et al., 2021). نتایج این آزمایش نشان دهنده افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره سان همپ بود که با استناد به آن ها، احتمال افزایش فعالیت رادیکال های آزاد اکسیژن وجود دارد. تلفیق اثرات آلوپاتیایی موجود در عصاره آبی سان همپ با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم می تواند سبب تشدید کاهش جوانه زنی و شاخص های طولی تاج خروس ریشه قرمز شود، با این حال پژوهش های بیشتری برای اثبات واکنش های فیزیولوژیک گیاهچه تاج خروس نیاز است.

نتیجه گیری

عصاره آبی سان همپ و سنتز عصاره آبی آن با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سبب کاهش و حتی توقف کامل جوانه زنی بذر تاج خروس شد. نانوذرات دی اکسید تیتانیوم سنتز شده با عصاره

- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Alebrahim, M.T., Parmoon, G., Feizpoor, S., & Hashemi, M. (2025). The efficacy of Sunn Hemp (*Crotalaria juncea*) and Fe₃O₄ nanoparticles in controlling weed seed germination. *Agronomy*, 15(4), 795. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040795>
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi, M., Ghavidel, A., & Alebrahim, M.T. (2022). The effect of Sunn hemp extract (*Crotalaria juncea*) formulated with chitosan nanoparticle on the germination of some weeds. *Journal of Seed Research*, 12(4), 11–28. <https://doi.org/10.30495/jsr.2023.1988281.1257> [In Persian]
- Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi, M., Ghavidel, A., & Alebrahim, M.T. (2023a). 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. <https://doi.org/10.22124/jms.2023.7605> [In Persian]
- Bais, H.P., Weir, T.L., Perry, L.G., Gilroy, S., & Vivanco, J.M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 233–266. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
- Baiyeri, K.P., Ugese, F.D., & Uchendu, T.O. (2011). The effect of previous treatments on passion fruit seed quality, and seedling emergence and growth qualities in soilless media. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5, 1397–1407. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.077>
- Chauhan, B.S., & Gill, G.S. (2014). Ecologically based weed management strategies. *Recent Advance in Weed Management: 1–11 components*. *Journal of Agroecology*, 5(2), 64–74. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1019-9_1
- Cho, A.H., Chase, C.A., & Treadwell, D.D. (2015). Apical dominance and planting density effects on weed suppression by Sunn Hemp (*Crotalaria juncea* L.). *Hortscience*, 50(2), 263–267. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.2.263>
- Choudhary, S.K., Kumar, A., & Kumar, R. (2020). Novel nanotechnological tools for weed management - A Review. *Chemical Science Review and Letters*, 9(36), 886–894. <https://doi.org/10.37273/chesci.CS205105136>
- Colegate, S.M., Gardner, D.R., Joy, R.J., Betz, J.M. & Panter, K.E. (2012). Dehydropyrrolizidine alkaloids, including monoesters with an unusual esterifying acid, from cultivated *Crotalaria juncea* (Sunn hemp cv. 'Tropic Sun'). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 3541–3550. <https://doi.org/10.1021/jf205296s>
- Costea, M., Weaver, S.E., & Tardif, F.J. (2004). The biology of Canadian weeds. 130. *Amaranthus retroflexus* L., *A. powellii* S. Watson and *A. hybridus* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 631–668. <https://doi.org/10.4141/P02-183>
- Cristaudo, A., Gresta, F., Luciani, F., & Restuccia, A. (2007). Effects of after-harvest period and environmental factors on seed dormancy of *Amaranthus* species. *European Weed Research Society Weed Research*, 47, 327–334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00574.x>
- Dayem, A.A., Hossain, M.K., Lee, S.B., Kim, K., Saha, S.K., Yang, G., Choi, H.Y., & Cho, S.G. (2017). The role of reactive oxygen species (ROS) in the biological activities of metallic nanoparticles. *International Journal of Molecular Science*, 18(1), 120. <https://doi.org/10.3390/ijms18010120>
- Ebadi, A., Feizpoor, S., & Ahmadnia, F. (2025). Investigating the impact of sunflower (*Helianthus annuus*) allelopathic aqueous extract in the green synthesis by titanium dioxide nanoparticles on wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) seed germination. *Journal of Plant Process and Function Iranian Society of Plant Physiology*, 14(66), 47–64. <https://doi.org/10.22034/14.66.47> [In Persian]
- Ellis, R.H. (1992). Seed and seedling vigor in relation to crop growth and yield. *Plant Growth Regulation*, 11, 249–255. <https://doi.org/10.1007/BF00024563>
- Enayati, V., Esfandiari, E., Pourmohammad, A., & Haj Mohammadnia Ghalibaf, K. (2019). Evaluation of different methods in seed dormancy breaking and germination of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*). *Iranian Journal of Seed Research*, 5(2), 129–137. <https://doi.org/10.29252/yujs.5.2.129> [In Persian]
- Eskandarinasab, M., Rafieiolhossaini, M., Roshandel, P., & Tadayon, M.R. (2019). Investigation of seed germination indices and anthocyanin content of Niger (*Guizotia abyssinica*) seedling under the effect of three nanoparticles. *Iranian Journal of Seed Research*, 5(2), 73–89. <https://doi.org/10.29252/yujs.5.2.73> [In Persian]
- Fatima, S., Ali, K., Ahmed, B., Al Kheraif, A.A., Syed, A., Elgorban, A.M., Musarrat, J. & Lee, J. (2021). Titanium dioxide nanoparticles induce inhibitory effects against planktonic cells and biofilms of human oral cavity isolates of *Rothia mucilaginosa*, *Georgenia* sp. and *Staphylococcus saprophyticus*. *Pharmaceutics*, 13(1564), 1–15. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13101564>
- Garzon, J., Vendramini, J.M.B., Silveira, M.L., Moriel, P., De Silva, H.M.S., Dubeux Jr, J.C.B., Keaneko, M., Carnelos, C.C. & Mamede, P.A. (2020). Harvest management and genotype effects on Sunn hemp forage characteristics. *Agronomy Journal*, 113(2021), 298–307. <https://doi.org/10.1002/agj2.20465>

- Grand, F., & Tucci, P. (2016). Titanium dioxide nanoparticles: a risk for human health? *Mini-Review in Medicinal Chemistry*, 16, 762–769. <https://doi.org/10.2174/1389557516666160321114341>
- Janusauskaite, D. (2023). Allelopathic effect of aqueous extracts of common sunflower on seed germination and growth of field pea. *Zemdirbyste-Agriculture*, 110(1), 17–26. <https://doi.org/10.13080/z-a.2023.110.003>
- Javaid, M.M., Bhan, M., Rathinasabapathi, B., & Chase, C.A. (2012). A non-protein amino acid from *Crotalaria juncea* foliage with allelopathic potential. *American Society for Horticultural Science, Abstract*.
- Khan, M.H., & Panda, S.K. (2009). Alterations in root lipid peroxidation and antioxidative responses in two rice cultivars under NaCl-salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(1), 81–89. <https://doi.org/10.1007/s11738-007-0093-7>
- Khandekar, D.C., Bhattacharyya, A.R., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100075>
- Macias, F.A., Torres, A., Galindo, J.L.G., Varela, R.M., Alvares, J.A., & Molinillo, J.M.G. (2002). Bioactive terpenoids from sunflower leaves cv. Peredovick. *Phytochemistry*, 61(6), 687–692. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00370-9)
- Maguire, J.D. (1962). Speed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. *Crop Science*, 2, 176–177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Mahiuddin, M.D., Saha, P., & Ochiai, B. (2020). Green synthesis and catalytic activity of silver nanoparticles based on *Piper chaba* stem extracts. *Nanomaterials*, 10(9), 1777, 1–15. <https://doi.org/10.3390/nano10091777>
- Marslin, G., Sheeba, C.J., & Franklin, G. (2017). Nanoparticles alter secondary metabolism in plants via ROS burst. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00832>
- Mokhtari, H., Hosseini, S.Z., & Kazemeini, S.A. (2014). Allelopathic effects of sorghum on Milk Thistle (*Silybum marianum* L.) seed germination and growth. *Research on Crop Ecophysiology*, 9(2), 115–123. https://journals.iau.ir/article_533661.html
- Morris, J.B., Chase, C., Treadwell, D., Koenig, R., Cho, A., Morales-Payan, J.P., Murphy, T., & Antonious, G.F. (2015). Effect of Sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) cutting date and planting density on weed suppression in Georgia, USA. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50, 614–621. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.1028855>
- Muhammad, Z., & Majeed, A. (2014). Allelopathic effects of aqueous extracts of sunflower on wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 46(5), 1715–1718. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46013965
- Nafees, A., Abbas, A., Us-Salam, I., & Hussain, F. (2021). Allelopathic effects of sunflower (*Helianthus annuus* L.) against *Luffa cylindrica* (L.) Roem. Ghazi University Journal of Phytosciences, 1(2), 124–132. <https://jphytosci.com/index.php/GUJP/article/view/29>
- Nivas, D., Uttam, D., & Dattatraya, G. (2017). Allelopathic effect of *Excoecaria agallocha* L. mangrove leaf leachate on germination and growth behavior of *Eleusine coracana* (Finger Millet). *American Journal Plant Physiology*, 12, 38–44. <https://doi.org/10.3923/ajpp.2017.38.44>
- Nusrat, A., Agrawal, N., & Kumar, J. (2018). Bio-herbicides for sustainable and eco-friendly weed control: a review. *International Journal of Advanced Research*, 6(12), 550–561. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/8173>
- Parenti, A., Cappelli, G., Zegada-Lizarazu, W., Sastre, C.M., Christou, M., Monti, A., & Ginaldi, F. (2021). SunnGro: A new crop model for the simulation of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) grown under alternative management practices. *Biomass and Bioenergy*, 146(2021), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105975>
- Perry, D.A. (1991). *Methodology and application of vigor tests*, International Seed Testing Association.
- Pham, X.N., Pham, D.T., Ngo, H.S., Nguyen, M.B., & 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. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1712375>
- Pula, J., Zandi, P., Stachurska-Swakori, A., Barabasz-Krasny, B., Mozdzen, K., & Wang, Y. (2020). Influence of alcoholic extracts from *Helianthus annuus* L. roots on the photosynthetic activity of *Sinapis alba* L. cv. Barka plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Science*, 70, 8–13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1034526>
- Qi, Y., Yan, B., Fu, G., Guan, X., Du, L., & Li, J. (2017). Germination of seeds and seedling growth of *Amaranthus retroflexus* L. following sublethal exposure of parent plants to herbicides. *Scientific Reports*, 7(157), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00153-4>
- Rigon, C.A.G., Salamon, A., Aguiar, A.C.M., & Cutti, L. (2018). Allelopathic effect of aqueous extracts of different organs of three sunflower cultivars on germination of radish. *Bioscience Journal*, 34(3), 577–586. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n3a2018-36771>

- Romano de Melo, G.S., Constantin, R.P., Abrahão, J., Foletto-Felipe, M.D.P., Constantin, R.P., Dantas dos Santos, W., Ferrarese-Filho, O., & Marchiosi, R. (2021). Titanium dioxide nanoparticles induce root growth inhibition in soybean due to physical damages. *Water, Air & Soil Pollution*, 232(25), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04955-7>
- Sahoo, T.R., Behera, B., Paikaray, R.K., Garnayak, L.M., Sethi, D., Jena, S., Raza, B., Panda, R.K., Song, B., Lal, M.K., & Kumar, A. (2023). Effects of sunflower residue management options on productivity and profitability of succeeding rice under different crop establishment methods. *Field Crops Research*, 290(2023), 108763. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108763>
- Sakadzo, N., Pahla, I., Muzemu, S., Mandumbu, R., & Makaza, K. (2018). Thornapple (*Datura stramonium* L.) allelopathy on cowpeas (*Vigna unguiculata* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) in Zimbabwe. *African Journal Agric Research*, 13(29), 1460–1467. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13226>
- Salvadori, M.R., Ando, R.A., Nascimento, C.A.O., & Corea, B. (2014). Bioremediation from wastewater and extracellular synthesis of copper nanoparticles by the fungus *Trichoderma koningiopsis*. *Journal of Environmental Science and Health*, 49, 286–295. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.910067>
- Sant'as-Miguela, V., Arias-Estevéz, M., Rodríguez-Seijo, A., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>
- Scott, S.J., Jones, R.A., & Williams, W.A. (1984). Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24(6), 1192–1199. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x>
- Skinner, E.M., Diaz-Perez, J.C., & Phatak, Sh.C. (2012). Allelopathic effects of Sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) on germination of vegetables and weeds. *Hortscience*, 47(1), 138–142. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.1.138>
- Stewart, R.C., & Beweley, J.D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65(2), 245–248. <https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245>
- Sudhakar, C., Lakshmi, A., & 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. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00450-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00450-2)
- Trusheva, B., Trusnkova, D., & Bankova, V. (2007). Different extraction methods of biologically active components from propolis: a preliminary study. *Chemistry Central Journal*, 1(13), 1–4. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-1-13>
- Vangessel, M.J., & Renner, K.A. (1990). Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and barnyard grass (*Echinochloa crusgalli*) interference in potatoes (*Solanum tuberosum*). *Weed Science*, 38(4, 5), 338–343. <https://doi.org/10.1017/S0043174500056642>
- Wang, K., Zhuo, Y., Chen, J., Gao, D., Ren, Y., Wang, C., & Qi, Z. (2020). Crystalline phase regulation of anatase–rutile TiO₂ for the enhancement of photocatalytic activity. *RSC Advances*, 10(71), 43592–43598. <https://doi.org/10.1039/D0RA09421H>
- Yuan, X., Wang, X., Zhang, Sh., Dong, X., Zhang, Sh., Zhou, W., Zhang, Ch., & 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. <https://doi.org/10.1002/slct.202100784>