فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۵، خرداد و تیرماه ۱۴۰۴ صفحه: ۱-۱۵
https://doi.org/10.22034/14.66.1

مقاله پژوهشی

# بررسی اثر اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های فیتوشیمیایی سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط تنش کم آبی

**سعیده رشیدی**

گروه کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶)

## چکیده

سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) با داشتن ترکیباتی از جمله آلکالوئیدها، فلاونوئیدها و تانن یکی از بهترین منابع آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی به شمار می‌رود. دانه گیاه سیاه‌دانه در طب سنتی بسیاری از کشورها جهت پیشگیری و درمان اختلالات و بیماری‌ها مصرف می‌شود. از آنجایی که تولید گیاهان دارویی می‌تواند تحت تأثیر عوامل محیطی مانند محدودیت آب قرار گیرد آزمایشی به منظور بررسی تأثیر اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی بر ویژگی‌های فیتوشیمیای از جمله درصد اسانس، میزان روغن، پروتئین برگ، گلوکز، فروکتوز، ساکاروز، پرولین، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز گیاه دارویی سیاه‌دانه، طی دو سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. این آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تیمار در سه تکرار صورت گرفت. کرت اصلی شامل سه سطح آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آب قابل دسترس) و فاکتورهای فرعی شامل اسید فولیک (صفر، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، گلوکز و پراکسیداز، اثر تیمارهای آبیاری بر محتوای پرولین و اثر تیمارهای آبیاری و اسید فولیک بر محتوای ساکاروز و فروکتوز معنی‌دار بود. در تیمار ۵۰٪ تنش خشکی، میزان کاتالاز (۴/۸۴ واحد میلی‌گرم بر پروتئین)، پراکسیداز (۲/۶۱ واحد میلی‌گرم بر پروتئین)، سوپراکسید دیسموتاز (۳/۶۱ واحد میلی‌گرم بر پروتئین)، پرولین (۱۶/۸۵میلی‌گرم بر گرم)، گلوکز (۵۲/۶۱ میلی‌گرم بر گرم)، فروکتوز (۳۱/۰۸ میلی‌گرم بر گرم) و ساکارز (۹/۸۰ میلی‌گرم بر گرم) بالا رفت. در تیمار تنش خشکی۵۰٪، ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، بیشترین میزان گلوکز (۵۸/۲۶ میلی‌گرم بر گرم)، فروکتوز (۳۶/۰۹ میلی‌گرم بر گرم) و ساکارز (۱۲/۱۱ میلی‌گرم بر گرم) بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش میزان اسانس، درصد روغن و پروتین برگ گردید. بیشترین درصد اسانس، درصد روغن و پروتئین برگ با کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم با ۱۰۰ درصد آب قابل استفاده مشاهده گردید. بطورکلی براساس نتایج این آزمایش استفاده از کود اسید فولیک (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۲ میلی‌گرم در لیتر) به منظور کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاه سیاه‌دانه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، اسید فولیک، پراکسیداز، پرولین، فروکتوز، کاتالاز

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: rashidi@pnu.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**مقدمه**

سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی یک ساله از خانواده آلاله است. سیاه‌دانه گیاهی گلدار و بومی منطقه جنوب غرب آسیا است و به دلیل داشتن ماده‌ای موسوم به تیموکوتین دارای اثر ضدنشنجی است (Ait Mbarek *et al*., 2007).

خشکی یکی از مهمترین عوامل تنش‌زا بوده که تولید محصولات را در سطح جهانی کاهش می‌دهد. کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است و میانگین بارندگی آن در حد یک سوم میانگین جهانی است، بنابراین با تنش‌های خشکی و خشکسالی‌های متناوبی درگیر است. خشکی یکی از مهمترین بازدارنده‌های تولید گیاهان در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به شمار می‌رود (Reddy *et al*., 2004). کاهش آب در دسترس گیاهان باعث تغییر در فشار تورژسانس سلول‌های گیاهی شده و این موضوع به نوبه خود باعث کاهش رشد و گسترش سلول‌های برگ می‌شود (Sequera-Mutiozabal *et al*., 2016). در شرایط تنش خشکی گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن از جمله پراکسید هیدروژن، سوپراکسید و رادیکال هیدروکسیل تجمع می‌یابند. گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن، ایجاد تنش ثانویه اکسیداتیو کرده که منجر به خسارت‌های جدی به ساختارهای سلولی می‌شود. گونه‌های گیاهی مقاوم معمولاً ظرفیت حفاظتی کارآمدتری در مقابل تنش اکسیداتیو القاءشده توسط تنش کم آبی دارند که می‌تواند از طریق بالابردن میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان افزایش پیدا کند (Hosseini Boldaji *et al*., 2012).

افزایش مواد آلی و تأمین عناصر غذایی خاک به مقدار کافی نقش مهمی در تولید کمی و کیفی محصولات کشاورزی دارد. باید عناصر غذایی که توسط اندام‌های گیاهی از زمین خارج می‌شود، از طریق کودهای آلی و شیمیایی به زمین برگردانده شود. مواد هیومیکی شامل مخلوطی از ترکیبات آلی مختلف هستند که از باقیمانده گیاهان و حیوانات ایجاد شده‌اند (Maccarthy, 2001). اشکال مواد آلی در طبیعت ترکیبات هوموسی است. ترکیبات هوموسی مواد آلی دارای دو نوع اسید الی مهم به نام‌های اسید هیومیک و اسید فولیک و جز هیومین است. اسید فولیک از ترکیبات هیومیکی است که اثرات سودمند بسیاری در افزایش مقاومت به خشکی، بهبود جذب مواد مغذی و کاهش آبشویی کود دارد. اسید فولیک به عنوان یک ترکیب شبه‌هورمونی نقش بسزایی در افزایش جذب عناصر غذایی از طریق خاصیت کلات‌کنندگی و احیاکنندگی و در نتیجه بهبود رشد گیاه دارد (Zheng *et al*., 2004; Nardi *et al*., 2002). اسید فولیک ماده استخراجی قوی از اسید هیومیک است و فواید بسیار زیادی برای خاک و گیاهان دارد. اسید فولیک نقش مهمی در افزایش فعالیت آنزیم‌های گیاهی دارد. از فواید اسید فولیک افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش، جذب بهتر مواد غذایی در گیاه و افزایش نفوذپذیری غشای سلولی است (Sebastiano *et al*.,2005). از راهکارهای افزایش متابولیت ثانویه گیاهی، استفاده از محرک‌های زنده و غیرزنده‌ای است که می‌تواند مسیرهای سنتز متابولیت‌های ثانویه را تحت تأثیر قرار داده و میزان تولید آنها را افزایش دهند (Neuman *et al*., 2009). یکی از محرک‌های مورد استفاده در این ارتباط نانو ذرات بوده که از این ذرات برای بالابردن ارزش محصولات کشاورزی و رفع مشکلات تنش‌های محیطی استفاده می‌شود (Reynods, 2002). در بین نانوذرات، نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم کاربرد بیشتری دارد. برتری این ترکیب نسبت به سایر ذرات شامل مقاومت شیمیایی بالا، غیرسمی بودن آن، طول عمر بالای این ماده، در دسترس‌بودن و هزینه کم آن است (Sungkaworn *et al*., 2007). اگر چه تیمار نانو ذرات تیتانیوم با توجه به نوع گیاه اثرات متفاوتی دارد ولی با بهینه‌سازی غلظت دی‌اکسید تیتانیوم برای گیاهان دارویی و معطر مختلف می‌توان کیفیت و تولید مواد مؤثره به ویژه اسانس را افزایش داد (Ahmad *et al*., 2018). استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مناسب‌ترین و بهترین گزینه از لحاظ تحویل بهینه عنصر به مقصد مورد نظر و استفاده صحیح از آن است. در مقایسه با سایر نانو ذرات، دی‌اکسید تیتانیوم کارایی بیشتر و خطرات زیست‌محیطی کمتری دارد (Ullah *et al*., 2020). Trevisan و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که ترکیب‌های هیومیکی به دلیل فعالیت‌های هورمونی با افزایش وزن ریشه، بازدهی فتوشیمیایی

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

و سطح آنتی‌اکسیدان‌ها باعث افزایش تحمل گیاه به تنش موجود خواهند شد. بر این اساس هدف از این پژوهش بررسی تأثیر اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر بهبود یا کاهش اثرهای منفی ناشی از تنش خشکی با توجه به صفات، گلوکز فروکتوز، ساکارز پرولین سوپراکسید دیسموتاز کاتالاز و پراکسیداز، درصد اسانس، میزان روغن پروتئین برگ در گیاه دارویی سیاه‌دانه است.

## مواد و روش‌ها

**طرح آزمایشی و تیمارها:** این آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای تنش خشکی در سه سطح شامل آبیاری ۱۰۰٪ (W1)، آبیاری ۷۵٪ (W2) و آبیاری ۵۰٪ (W3) آب قابل دسترس گیاه بود که به وسیله دستگاه TDR مدل ۱۵۰ ساخت کمپانی آمریکا از نوع spectrum اندازه‌گیری انجام و کرت‌های فرعی شامل اسید فولیک در سه سطح صفر، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کرت فرعی شامل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سه سطح صفر، ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر بود. اسید فولیک در دو مرحله ساقه‌دهی و شروع گلدهی به صورت محلول‌پاشی برگی و محلول نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در دو مرحله ساقه‌دهی و شروع گلدهی استفاده شد. در ابتدا زمین آزمایش در زمستان سال ۱۴۰۰ و سال ۱۴۰۱ با گاوآهن شخم عمیق زده شد. در اول اسفندماه هر دو سال با عملیات دیسک‌زنی و کولتیواتورزنی زمین آزمایش برای کاشت آماده گردید. سپس توسط فاروئر پشته‌هایی به عرض ۳۰ سانتی‌متر ایجاد و زمین به صورت جوی و پشته آماده شد. هر بلوک شامل ۲۷ کرت با فاصله یک متر در نظر گرفته شد و هر کرت شامل شش خط کشت به طول ۵ متر با فاصله ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بلوک‌ها از یکدیگر ۱ متر بود. پس از آماده‌سازی زمین بذر سیاه‌دانه به صورت دستی در تاریخ ۲۵ فروردین‌ماه ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ کشت گردید و تا مرحله شش برگی آبیاری همه کرت‌ها بدون کاربرد تیمارهای تنش انجام شد و حجم آب استفاده شده یادداشت گردید. گیاهان سبزشده در چهار تا شش برگی تنک شدند. محلول‌پاشی اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم طی دو مرحله رشد (مرحله ساقه‌دهی و شروع گلدهی) انجام شد. مشخصات آب و هوایی منطقه مورد آزمایش در جدول ۱ و ویژگی‌های خاک در جدول ۲ آورده شده است.

**نحوه اعمال تیمار تنش خشکی:** برای اندازه‌گیری رطوبت ظرفیت زراعی (FC) پژمردگی (PWP) از روش مزرعه‌ای و صفحات تحت فشار (آزمایشگاهی) استفاده گردید. از این‌رو یک نمونه خاک مرکب برای اندازه‌گیری رطوبت مزرعه‌ای و تعیین منحنی رطوبتی خاک به آزمایشگاه فیزیک خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب ارسال شد با داشتن FC و PWP و کم‌کردن آنها از یکدیگر میزان آب قابل استفاده (AW) خاک مشخص و بعد از طریق فرمول زیر میزان آب خالص محاسبه شد.

$$D = (FC-Mt) \times bd \times d /100$$

D= عمق آب آبیاری به میلی‌متر، FC= رطوبت ظرفیت زراعی، MT= درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، D= عمق ریشه به میلی‌متر، bd= جرم مخصوص ظاهری گرم بر سانتی‌متر مکعب

با توجه به اعمال فاکتور آبیاری در سطوح (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) میزان درصد رطوبت حجمی و رطوبت خاک با دستگاه رطوبت‌سنج دستگاه اندازه‌گیری شد و وقتی رطوبت خاک به ترتیب در سطح ۵۰٪ آب قابل استفاده رطوبت حجمی به عدد ۶/۷۵٪ و سطح ۷۵٪ آب قابل دسترس رطوبت حجمی به عدد ۱۰/۱۲٪ و در سطح ۱۰۰٪ آب قابل استفاده درصد رطوبت حجمی به عدد ۱۳/۵٪ رسید، اقدام به آبیاری شد.

**اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز:** برای اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز از روش Chance و Maehly (۱۹۹۵) استفاده شد. مخلوط واکنش شامل ۰/۸۱ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH= ۶/۶، ۲۰ میکرولیتر پروتئین محلول نمونه و ۹۰ میکرولیتر گوئیکول ۱٪ به عنوان الکترون‌دهنده مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط واکنش در کووت ریخته و قبل از اندازه‌گیری سرعت

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**جدول ۱- مشخصات آب و هوایی شاهرود در فصل زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰**

| سال زراعی | ماه‌های سال | میانگین دمای ماهیانه (درجه سانتی‌گراد) | میانگین رطوبت ماهیانه (٪) | بارش ماهیانه (میلی‌متر) |
|---|---|---|---|---|
| ۱۴۰۰-۱۴۰۱ | فروردین | ۱۲/۴ | ۳۷ | ۱۴/۳ |
| | اردیبهشت | ۱۳/۳ | ۴۶ | ۱۴/۲ |
| | خرداد | ۲۱/۴ | ۲۸ | ۴/۲ |
| | تیر | ۲۴ | ۱۷ | ۰ |
| | مرداد | ۲۴ | ۱۸ | ۰ |
| | شهریور | ۲۱/۸ | ۲۱ | ۰ |
| ۱۴۰۱-۱۴۰۲ | فروردین | ۱۰/۷ | ۴۲ | ۲۴/۵ |
| | اردیبهشت | ۱۴/۸ | ۳۴ | ۸/۹ |
| | خرداد | ۲۱ | ۳۰ | ۴/۲ |
| | تیر | ۲۶/۲ | ۲۱ | ۰ |
| | مرداد | ۲۴ | ۲۲ | ۰ |
| | شهریور | ۲۲ | ۲۰ | ۰ |

**منبع: اداره هواشناسی شاهرود**

**جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش**

| خصوصیات فیزیکی | خصوصیات شیمیایی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | EC (dS/m) | PH | نیتروژن (٪) | فسفر (mg/kg) | پتاسیم (mg/kg) |
| ۱۷ درصد رس، ۶۲ درصد سیلت و ۴۱ درصد شن | | | | | |
| لومی‌رسی | ۱/۱ | ۷/۷۰ | ۰/۰۹ | ۷/۱ | ۲۹۶ |

واکنش، ۹۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۰/۳٪ به عنوان پذیرنده الکترون به مخلوط واکنش اضافه شد و مقدار جذب در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر به مدت ۶۰ ثانیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

**اندازه‌گیری پراکسیداز:** سنجش فعالیت این آنزیم به روش Mac-Adam و همکاران (۱۹۹۲) انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۰/۸۱ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH=۶/۶، ۲۰ میکرولیتر پروتئین محلول نمونه و ۹۰ میکرولیتر گوئیکول ۱ به عنوان الکترون‌دهنده مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط واکنش در کووت ریخته و قبل از اندازه‌گیری سرعت واکنش، ۹۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۰/۳٪ به عنوان پذیرنده الکترون به مخلوط واکنش اضافه و مقدار جذب در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر به مدت ۶۰ ثانیه در ۲۵ درجه سانتی‌گراد با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل uv 1900 شیمادزو) اندازه‌گیری گردید. تغییرات آنزیمی بر حسب تغییرات جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین بیان و با شاهد که همان مخلوط واکنش قبل از اضافه‌کردن پراکسید هیدروژن است مقایسه شد.

**اندازه‌گیری آنزیم سوپراکسید دیسموتاز:** آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با استفاده از احیاء نوری نیتروبلوتترازولیوم که اساس اندازه‌گیری فعالیت این آنزیم است، اندازه‌گیری شد. بر اساس این روش ۳ میلی لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار (اسیدیته ۸/۷) متیونین ۱۳ میلی‌مولار، نیتروبلو

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

ترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ریبوفلاوین ۲۰ میکرومولار، EDTA ۱/ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی واکنش تهیه شد و بعد نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در مقابل نور ۵۰۰۰ لوکس قرار داده شد. بی‌درنگ بعد از قطع نور، جذب نمونه‌ها در ۵۶۰ نانومتر خوانده شد (Giannopolities and Ries, 1977).

**اندازه‌گیری پرولین:** برای تعیین میزان غلظت پرولین یک میلی‌لیتر از عصاره الکلی با ۱۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر رقیق و بعد ۵ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین (CHO) به آن اضافه شد. بعد از آن ۵ میلی‌لیتر اسید استیک کلاسیال به آن افزوده وبعد از به هم زدن به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد. پس از بیرون آوردن از حمام آب جوش و خنک‌شدن آنها، ۱۰ میلی‌لیتر بنزن به هر یک از نمونه‌ها افزوده و به شدت تکان داده شد تا پرولین وارد مرحله بنزن شود نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به حال سکون رها شدند، استانداردهایی از پرولین (صفر تا ۰/۱ میکرومول بر میلی‌لیتر) تهیه و در نهایت میزان جذب محلول‌های استاندارد و نمونه‌ها در طول‌موج ۵۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Bates *et al.*, 1973).

**اندازه‌گیری قندها:** برای تعیین کل میزان قندهای محلول، ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره تهیه شده یا استانداردها را برداشته و به آن ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون اضافه شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده و پس از خنک‌شدن نمونه‌ها جذب آنها در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. برای رسم منحنی استاندارد از گلوکز خالص استفاده شد. غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه و نمونه‌های اصلی عملیات ممکن روی آنها انجام شد (Mc Cready *et al.*, 1950).

**اندازه‌گیری پروتئین:** برای اندازه‌گیری میزان پروتئین، یک گرم از نمونه برگی خشک شده در هاون چینی له شد. سپس در لوله آزمایش ریخته و به آن ۴ گرم کاتالیزور (۱۰ گرم سولفات پتاسیم + ۱ گرم سولفات مس) و ۱۰میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه و در دستگاه هضم کجلدال به مدت یک ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس دو و نیم ساعت در دمای ۳۹۵ درجه سلسیوس قرار داده و بعد از خشک‌شدن لوله‌ها مقدار نیتروژن نمونه با دستگاه کجلدال خوانده شد. با اندازه‌گیری، میزان پروتین از حاصل ضرب درصد پروتین در ۶/۲۶ بدست آمد (قلی‌نژاد و رضایی، ۱۳۹۳).

**اندازه‌گیری روغن:** بوته‌ها پس از برداشت ابتدا خشک و پس از عمل کوبیدن دانه‌ها جدا شدند. بعد از بوجاری دانه‌ها، برای تعیین درصد روغن از هر کرت ۳۰ گرم دانه آسیاب شده برداشته شد و سپس به وسیله دستگاه سوکسله به مدت شش ساعت تحت تأثیر ان- هگزان قرار گرفت. روش کار به این صورت بود که ۵ گرم نمونه را داخل کاغذ صافی وزن کرده و کاغذ صافی تا شده و داخل کارتوش قرار گرفت. سپس دستگاه سوکسله رابسته و جریان آب برقرار شد. در قسمت استخراج‌کننده دستگاه تا حدی حلال ریخته شد تا یکبار عمل تخلیه از استخراج‌کننده انجام شود. سپس زیر دستگاه روشن و به مدت شش ساعت تحت حرارت قرار گرفت. بعد از اتمام این زمان کاغذ صافی خارج و در داخل آون خشک شد. سپس با استفاده از معادله زیر درصد روغن محاسبه شد (Vaseghi and Davazdahemami, 2016).

**اندازه‌گیری درصد اسانس:** استخراج اسانس با روش تقطیر و استفاده از دستگاه کلونجر انجام شد (خرم‌دل و همکاران، ۱۳۸۷).

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ با استفاده از آزمون LSD انجام شد و رسم جداول نیز با استفاده از Word انجام شد.

## نتایج

**محتوای آنزیم کاتالاز:** بر اساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و ۱ درصد بر محتوای آنزیم کاتالاز اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). در رابطه با اثرهای متقابل دوگانه نیز مشخص شد که اثر آبیاری × اسید فولیک و آبیاری × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای آنزیم کاتالاز اثر معنی‌دار نشان دادند. بر

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر صفات مورد بررسی گیاه دارویی سیاه‌دانه تحت تنش خشکی**

| منابع تغییر | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | کاتالاز | پراکسیداز | سوپراکسید دیسموتاز | پرولین | گلوکز |
| سال | ۱ | ۰/۰۰۰۰ n.s | ۱/۴۵ ** | ۰/۵۰۵ ** | ۲/۱۷ ** | ۱۷/۸۹۳ n.s |
| سال × بلوک | ۴ | ۰/۰۱۵ | ۰/۴۰۷ | ۰/۲۲۹ | ۰/۰۱۵ | ۲۶/۷۷۶ |
| آبیاری (A) | ۲ | ۴۳/۵۸ ** | ۸/۷۱ ** | ۱۹/۶۷ ** | ۹۸۶/۷۳ ** | ۲۲۶۰/۷۴۷ ** |
| فاکتورa× سال | ۲ | ۰/۰۰۱ n.s | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۲۰ n.s | ۰/۵۱۸ * | ۱۴/۸۱۶ n.s |
| بلوکa× سال | ۸ | ۰/۰۰۱ n.s | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۰۹ n.s | ۰/۱۳۹ n.s | ۱۰/۵۴۴ n.s |
| اسید فولیک (B) | ۲ | ۱۴/۵۶ * | ۸/۴۴۶ * | ۷/۹۷ ** | ۷۹/۰۲ ** | ۲۸/۶۸۱ * |
| B× سال | ۲ | ۰/۰۱۱ n.s | ۰/۰۲۰ n.s | ۰/۰۱۱ n.s | ۰/۳۵۱ n.s | ۵/۸۵۰ n.s |
| نانو ذرات دی‌اکسید (C) | ۲ | ۱/۵۴ ** | ۰/۷۶۲ ** | ۰/۸۴۷ ** | ۳/۴۱۱ ** | ۴۸۳/۹۰ ** |
| C × سال | ۲ | ۰/۰۰۷ n.s | ۰/۰۰۰ ns | ۰۰۱ n.s | ۰/۰۱۸ n.s | ۹/۷۴۱ n.s |
| B×A | ۴ | ۰/۰۹۷ ** | ۰/۱۶۹ ** | ۰/۲۷۲ ** | ۰/۸۶۱ ** | ۲۲۹/۸۰۵/ ** |
| B×A در سال | ۴ | ۰/۰۰۵ n.s | ۰/۰۰۸ n.s | ۰/۰۲۵ n.s | ۰/۵۳۷ n.s | ۱۱/۵۲۳ n.s |
| C×A | ۴ | ۰/۱۱۳ ** | ۰/۰۰۴ ** | ۰/۰۰۶ ** | ۰/۴۷۹ * | ۱۵۶/۲۴۵ ** |
| C×A در سال | ۴ | ۰/۰۱۱ n.s | ۰/۰۰۰ n.s | ۰/۰۰۴ n.s | ۱/۱۲ ** | ۹/۹۴۲ n.s |
| C×B | ۴ | ۰/۰۱۳ n.s | ۰/۰۱۹ ** | ۰/۰۳۹ ** | ۰/۵۳۴ * | ۲۴۹/۴۶ ** |
| C×B در سال | ۴ | ۰/۰۰۳ n.s | ۰/۰۰۴ n.s | ۰/۰۱۱ n.s | ۱/۲۰۳ ** | ۱۴/۵۵۶ n.s |
| C×B×A | ۸ | ۰/۰۱۳ * | ۰/۰۳۵ ** | ۰/۰۶۷ * | ۱/۰۳۵ ** | ۱۸۶/۲۱۲ n.s |
| C×B×A در سال | ۸ | ۰/۰۰۴ n.s | ۰/۰۰۱ n.s | ۰/۰۳۲ n.s | ۰/۶۵۲ * | ۸/۸۱۷ n.s |
| خطا | ۹۶ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۱۶ | ۰/۱۶۶ | ۹/۲۳۷ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۲/۹۹ | ۴/۱۹ | ۵/۲۱ | ۳/۷۶ | ۶/۶۹۹ |

**ns عدم تفاوت معنی‌دار و * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد**

همین اساس اثر متقابل سه گانه آبیاری × اسید فولیک × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز در سطح احتمال ۵٪ بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه محتوای آنزیم کاتالاز نشان داد که در شرایط۵۰٪ آب قابل دسترس بیشترین میانگین (۴/۸۴ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) با عدم کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید فولیک و کمترین میانگین (۱/۸۴ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) با کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس بدست آمد (جدول ۴). نتایج تحقیقات بر روی ذرت (Kellos *et al.*, 2008) نشان دادند که ماهیت آنزیم کاتالاز به طور معنی‌دار تحت تنش خشکی افزایش می‌یابد. مطالعه Petridis و همکاران (۲۰۱۲) نشان داده است که تحت تنش خشکی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی در چهار رقم زیتون افزایش یافته و البته این افزایش در همه رقم‌های مورد مطالعه، یکسان نبوده است.کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید فولیک موجب کاهش تنش اکسیداتیو و کاهش آسیب وارد شده به غشای سلول می‌شوند که این عمل را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی انجام

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**ادامه جدول ۳-**

| منابع تغییر | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | فروکتوز | ساکارز | پروتئین برگ | میزان روغن | درصد اسانس |
| سال | ۱ | ۰/۲۰۹$^{n.s}$ | ۲/۴۸۳$^{ns}$ | ۲/۸۳$^{ns}$ | ۱۳/۵۴ $^{n.s}$ | ۱/۱۷ $^{n.s}$ |
| سال × بلوک | ۴ | ۱/۲۹۰ | ۰/۷۷۱$^{n.s}$ | ۰/۰۱۴ $^{n.s}$ | ۱/۵۳ $^{n.s}$ | ۰/۰۴ $^{n.s}$ |
| آبیاری (A) | ۲ | ۱۲۸۹/۴۵$^{**}$ | ۲۷۷/۱۷۲$^{**}$ | ۷۷۶/۴۳$^{**}$ | ۴۵۴/۹۵$^{**}$ | ۳۳/۹۴$^{**}$ |
| فاکتورa× سال | ۲ | ۰/۴۷۷$^{*}$ | ۱/۳۹۵$^{n.s}$ | ۰/۴۱۸ $^{n.s}$ | ۲/۵۴ $^{n.s}$ | ۱/۳۵ $^{n.s}$ |
| بلوکa× سال | ۸ | ۰/۰۳۶$^{n.s}$ | ۰/۶۳۳$^{n.s}$ | ۰/۱۲۳ $^{n.s}$ | ۰/۷۲۶ $^{n.s}$ | ۱/۷۸ $^{n.s}$ |
| اسید فولیک (B) | ۲ | ۲۱۳/۸۸$^{**}$ | ۹۱/۰۲۷$^{**}$ | ۷۴/۵۲$^{**}$ | ۸۰/۰۲۳$^{**}$ | ۲۱/۴۸$^{**}$ |
| B× سال | ۲ | ۰/۳۱۲$^{*}$ | ۱/۱۳۶$^{n.s}$ | ۰/۲۵۱ $^{n.s}$ | ۱/۲۱ $^{n.s}$ | ۰/۴۴ $^{n.s}$ |
| نانو ذرات دی‌اکسید (C) | ۲ | ۳۶/۹۰$^{**}$ | ۱/۵۶۵$^{n.s}$ | ۲/۴۳۸$^{**}$ | ۱/۷۲$^{**}$ | ۲/۸۵$^{**}$ |
| C × سال | ۲ | ۰/۱۱۸$^{n.s}$ | ۰/۳۶۴$^{n.s}$ | ۰/۰۱۷ $^{n.s}$ | ۰/۲۸۴ $^{n.s}$ | ۱/۵۶ $^{n.s}$ |
| B×A | ۴ | ۳/۱۹۰$^{**}$ | ۰/۸۶۱$^{n.s}$ | ۰/۹۲۶$^{n.s}$ | ۰/۵۶۶ $^{n.s}$ | ۰/۳۶۲ $^{n.s}$ |
| B×A در سال | ۴ | ۰/۱۶۰$^{n.s}$ | ۰/۹۹۶$^{n.s}$ | ۰/۵۳۷ $^{n.s}$ | ۰/۷۸۴ $^{n.s}$ | ۰/۵۲۱ $^{n.s}$ |
| C×A | ۴ | ۰/۳۷۴$^{**}$ | ۰/۹۱۷$^{n.s}$ | ۰/۴۳۷$^{**}$ | ۰/۸۴۹$^{**}$ | ۰/۴۳۱$^{**}$ |
| C×A در سال | ۴ | ۰/۲۳۳$^{n.s}$ | ۱/۶۹۹$^{n.s}$ | ۱/۷۲ $^{n.s}$ | ۱/۷۳ $^{n.s}$ | ۰/۹۳ $^{n.s}$ |
| C×B | ۴ | ۳/۹۴۸$^{**}$ | ۱/۷۹۵$^{n.s}$ | ۰/۴۳۳$^{**}$ | ۱/۹۵$^{**}$ | ۰/۰۰۱$^{**}$ |
| C×B در سال | ۴ | ۰/۱۲۶$^{n.s}$ | ۳/۹۴۸$^{n.s}$ | ۱/۸۴ $^{n.s}$ | ۴/۳۲ $^{n.s}$ | ۰/۰۲ $^{n.s}$ |
| C×B×A | ۸ | ۱/۴۶۷$^{**}$ | ۲/۱۵۷$^{*}$ | ۱/ ۸۵$^{n.s}$ | ۳/۵۴$^{n.s}$ | ۰/۰۱ |
| C×B×A در سال | ۸ | ۰/۱۷۷$^{n.s}$ | ۰/۶۰۵$^{n.s}$ | ۰/۵۲۶ $^{n.s}$ | ۰/۷۰۵ $^{n.s}$ | ۰/۰۰۸ $^{n.s}$ |
| خطا | ۹۶ | ۰/۱۲۹ | ۱/۱۹۱ | ۰/۱۵۲ | ۱/۹۱ | ۰/۰۱ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱/۲۸۵ | ۱۲/۳۳۵ | ۱۱/۵۳ | ۷/۸۴ | ۶/۶۵ |

**ns عدم تفاوت معنی‌دار و * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد**

می‌دهند.

**محتوای آنزیم پراکسیداز:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب در سطح احتمال ۱، ۵ و ۱ درصد بر محتوای آنزیم پراکسیداز اثرمعنی‌داری داشتند (جدول ۳). اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیز بر محتوای آنزیم پراکسیدز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شدند (جدول ۳). عدم کاربرد اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۵۰٪ آب قابل دسترس بالاترین میانگین (۲/۶۱ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) محتوای آنزیم پراکسیداز را نشان داد. همچنین کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس کمترین میانگین (۰/۸۱واحد میلی‌گرم بر پروتئین) این شاخص را نشان داد (جدول ۴). نتایج تحقیقات بر روی آفتابگردان (Manivannan *et al.*, 2008) نشان دادند که ماهیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تنش خشکی افزایش می‌یابد.

**محتوای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). کلیه اثرات متقابل دوگانه در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای آنزیم

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین اثرهای متقابل آبیاری و اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در صفات مورد بررسی**

| سطح آبیاری (آب قابل دسترس) | اسید فولیک | نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم | کاتالاز | پراکسیداز | SOD | پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) | گلوکز | فروکتوز | ساکارز |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (میلی‌گرم در لیتر) | | (Unit/mg pro) | | | (میلی‌گرم بر گرم) | | |
| | | ۰ | ۴/۸۴$^{a}$ | ۲/۶۱$^{a}$ | ۳/۶۱$^{a}$ | ۱۶/۸۵$^{a}$ | ۵۲/۶۱$^{d}$ | ۳۱/۰۸$^{f}$ | ۹/۸۰$^{cd}$ |
| | ۰ | ۱ | ۲/۶۱$^{b}$ | ۲/۶۱$^{b}$ | ۳/۵۹$^{b}$ | ۱۵/۹۲$^{b}$ | ۵۲/۶۶$^{d}$ | ۳۱/۳۳$^{f}$ | ۹/۷۸$^{cd}$ |
| | | ۲ | ۲/۴۲$^{c}$ | ۲/۴۲$^{c}$ | ۳/۵۳$^{b}$ | ۱۶/۲۱$^{c}$ | ۵۳/۳۵$^{c}$ | ۳۲/۱۲$^{e}$ | ۸/۴۵$^{ef}$ |
| | | ۰ | ۲/۲۱$^{d}$ | ۲/۲۱$^{d}$ | ۳/۵۹$^{b}$ | ۱۵/۵۲$^{c}$ | ۵۴/۵۶$^{bcd}$ | ۳۲/۶۲$^{d}$ | ۱۰/۸۹$^{abc}$ |
| ۵۰ | ۲۵۰ | ۱ | ۴/۳۱$^{e}$ | ۲/۰۶$^{fg}$ | ۳/۳۲$^{d}$ | ۱۵/۱۵$^{d}$ | ۵۴/۷۰$^{bcd}$ | ۳۲/۲۲$^{de}$ | ۱۱/۱۲$^{ab}$ |
| | | ۲ | ۴/۱۵$^{f}$ | ۱/۸۴$^{k}$ | ۲/۹۱$^{e}$ | ۱۵/۴۳$^{c}$ | ۵۶/۹۹$^{ab}$ | ۳۴/۳۶$^{bc}$ | ۱۱/۹۲$^{a}$ |
| | | ۰ | ۳/۷$^{fg}$ | ۱/۵۹$^{jk}$ | ۲/۷۸$^{f}$ | ۱۴/۲۳$^{e}$ | ۲۶/۶۶$^{m}$ | ۳۴/۱۳$^{c}$ | ۱۱/۸۹$^{ab}$ |
| | ۵۰۰ | ۱ | ۳/۷۹$^{f}$ | ۱/۶۲$^{m}$ | ۲/۶۲$^{g}$ | ۱۳/۸۷$^{e}$ | ۵۶/۷۰$^{abc}$ | ۳۴/۶۵$^{b}$ | ۱۱/۹۴$^{a}$ |
| | | ۲ | ۳/۵$^{h}$ | ۱/۴۶$^{ef}$ | ۲/۶۳$^{h}$ | ۱۳/۲۸$^{f}$ | ۵۸/۲۶$^{a}$ | ۳۶/۰۹$^{a}$ | ۱۲/۱۱$^{a}$ |
| | | ۰ | ۳/۸$^{f}$ | ۱/۸۴$^{ef}$ | ۲/۸۶$^{f}$ | ۱۲/۲۷$^{g}$ | ۴۴/۴۹$^{efg}$ | ۲۴/۴۸$^{m}$ | ۵/۳۵$^{jsk}$ |
| | ۰ | ۱ | ۳/۶$^{g}$ | ۱/۸۸$^{gh}$ | ۲/۷$^{g}$ | ۱۲/۱۱$^{g}$ | ۴۵/۴۴$^{ef}$ | ۲۵/۲۴$^{l}$ | ۴/۶۹$^{k}$ |
| | | ۲ | ۳/۴۹$^{h}$ | ۱/۷۴$^{kl}$ | ۲/۵۹$^{h}$ | ۱۱/۵۲$^{h}$ | ۴۴/۱۵$^{fg}$ | ۲۶/۱۲$^{k}$ | ۵/۵۸$^{jk}$ |
| | | ۰ | ۳/۳۴$^{i}$ | ۱/۵۸$^{lm}$ | ۲/۳۶$^{i}$ | ۱۰/۹۸$^{i}$ | ۴۴/۸۶$^{efg}$ | ۲۶/۵۱$^{k}$ | ۵/۹۶$^{ij}$ |
| ۷۵ | ۲۵۰ | ۱ | ۲/۹۷ | ۱/۵۴$^{n}$ | ۲/۲۸$^{kj}$ | ۱۰/۵۷$^{ij}$ | ۴۵/۰۳$^{efg}$ | ۲۷/۰۴$^{j}$ | ۶/۴۸$^{ij}$ |
| | | ۲ | ۲/۸۳$^{k}$ | ۱/۴۸$^{o}$ | ۲/۲۸$^{l}$ | ۱۰/۲۵$^{kj}$ | ۴۵/۵۷$^{ef}$ | ۲۷/۵۶$^{i}$ | ۷/۰۷g$^{hi}$ |
| | | ۰ | ۲/۷۹$^{l}$ | ۱/۳۲$^{p}$ | ۱/۹$^{m}$ | ۹/۸۹$^{kl}$ | ۴۴/۲۷$^{efg}$ | ۲۸/۰۸$^{h}$ | ۶/۸۹$^{ghi}$ |
| | ۵۰۰ | ۱ | ۲/۵۱$^{m}$ | ۱/۲$^{rs}$ | ۱/۸۸$^{p}$ | ۹/۴۹$^{l}$ | ۴۵/۵۷$^{ef}$ | ۲۸/۳۸$^{h}$ | ۷/۸۶$^{fgh}$ |
| | | ۲ | ۲/۳$^{i}$ | /۹۴$^{ij}$ | ۱/۶۵$^{r}$ | ۸/۹۵$^{m}$ | ۴۷/۷۰$^{e}$ | ۳۰/۶۶$^{g}$ | ۷/۹۳$^{fg}$ |
| | | ۰ | ۳/۱۲$^{i}$ | ۱/۷۲$^{ih}$ | ۲/۳۴$^{kj}$ | ۸/۲۱$^{n}$ | ۳۵/۸۷$^{kl}$ | ۲۱/۲۸$^{q}$ | ۷/۷۹$^{fg}$ |
| | ۰ | ۱ | ۳/۰۱$^{k}$ | ۱/۷۳$^{mn}$ | ۲/۳۵$^{ij}$ | ۷/۹۹$^{n}$ | ۳۷/۲۳i$^{-l}$ | ۲۱/۰۵$^{p}$ | ۷/۶۹$^{fgh}$ |
| | | ۲ | ۲/۷۴$^{k}$ | ۱/۵۲$^{op}$ | ۲/۲$^{kl}$ | ۷/۳۳$^{o}$ | ۳۶/۵۹$^{jkl}$ | ۲۱/۴۸$^{o}$ | ۸/۰۱$^{fg}$ |
| | | ۰ | ۲/۵۴$^{l}$ | ۱/۲۸$^{p}$ | ۲/۱۲$^{m}$ | ۶/۷۴$^{p}$ | ۳۴/۲۶$^{l}$ | ۲۴/۳۵$^{m}$ | ۹/۸۲$^{cd}$ |
| ۱۰۰ | ۲۵۰ | ۱ | ۲/۴۹$^{l}$ | ۱/۲۸$^{rs}$ | ۱/۹۱$^{o}$ | ۶/۳۱$^{pq}$ | ۳۸/۹۳$^{h-k}$ | ۲۳/۱۳$^{n}$ | ۹/۳۰$^{de}$ |
| | | ۲ | ۲/۲۲$^{m}$ | ۱/۰۳$^{q}$ | ۱/۶۷$^{q}$ | ۶/۰۶$^{qr}$ | ۴۰/۴۲$^{hi}$ | ۲۴/۲۷$^{m}$ | ۸/۸۰$^{def}$ |
| | | ۰ | ۲/۲۲$^{m}$ | ۱/۱۱$^{s}$ | ۱/۹۱$^{n}$ | ۵/۱$^{r}$ | ۳۹/۹۷$^{hij}$ | ۲۴/۲۲$^{m}$ | ۹/۸۳$^{cd}$ |
| | ۵۰۰ | ۱ | ۲/۱$^{n}$ | /۹۱$^{t}$ | ۱/۷۶$^{qr}$ | ۶/۱۱$^{rs}$ | ۴۱/۸۶$^{gh}$ | ۲۵/۶۱$^{l}$ | ۱۰/۶۶$^{bc}$ |
| | | ۲ | ۱/۸۴ | /۸۱$^{u}$ | ۱/۶۴$^{s}$ | ۵/۷۲$^{s}$ | ۴۴/۹۰$^{efg}$ | ۲۷/۱۶$^{ij}$ | ۱۱/۳۸$^{ab}$ |

**در هر ستون، میانگین‌های با حروف مشابه در سطح ۵٪ آزمون LSD با یکدیگر اختلاف ندارند.**

سوپراکسید دیسموتاز اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). بر همین اساس اثر متقابل سه گانه آبیاری × اسید فولیک × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز در سطح احتمال ۵٪ بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین محتوای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در پاسخ به برهمکنش آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نشان داد که در شرایط ۵۰٪

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

آب قابل دسترس بالاترین میانگین (۳/۶۱ واحد میلی‌گرم بر پروتئین) با عدم کاربرد اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، و کمترین میانگین در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس (۱/۶۴واحد میلی‌گرم بر پروتئین) با کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک بدست آمد (جدول ۴). مطابق با نتایج این تحقیق مشاهده می‌شود که تنش خشکی عاملی است که می‌تواند فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را افزایش دهد و نانوذرات نیز در شرایط تنش قادر به افزایش فعالیت این آنزیم هستند (مظفری و همکاران، ۱۳۹۵). در آزمایشی که توسط (Soltani *et al.*, 2013) بر روی گیاه عدس انجام شد، اثر محلولپاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر فعالیت‌های آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بود. Soleimani و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که با افزایش سطح تنش تا حد مشخصی، بیان ژن سوپراکسید دیسموتاز نیز افزایش می‌یابد.

**محتوای پرولین:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری، اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای پرولین اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). کلیه اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نیز در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای پرولین اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). غلظت پرولین طی تنش خشکی در تمامی گیاهان تحت تنش برای تنظیم فشار اسمزی درون افزایش پیدا می‌کند. مقایسه محتوای پرولین در پاسخ به کاربرد آبیاری × اسید فولیک × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نشان داد که در شرایط ۵۰٪ آب قابل دسترس بالاترین میانگین (۱۶/۸۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با عدم کاربرد اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کمترین میانگین در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس (۵/۷۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک بدست آمد (جدول ۴). محتوای پرولین در برگ‌های بسیاری از گیاهان به وسیله تنش‌ها از جمله خشکی افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد که تجمع پرولین آزاد یک پاسخ متداول به تنش در گیاهان عالی باشد. البته اسیدهای آمینه دیگری نیز تحت تنش‌های خشکی و شوری انباشته می‌شوند. اما درجه تغییرات آنها با تجمع پرولین که ظرف مدت کوتاهی از اعمال تنش به سطوح خیلی بالا می‌رسد قابل مقایسه نیست (Tavakoli *et al.*, 2016). تجمع پرولین یکی از شاخص‌های مهم تحمل به تنش خشکی در گیاهان عالی است (Bartels and Sunkars, 2004). تحت تنش خشکی، تجمع پرولین به ایجاد تنظیم اسمزی در سلول‌های گیاه که تحت کمبود آب قرار دارند کمک می‌کند (Chaves *et al.*, 2002). همچنین Phutela و همکاران (۲۰۰۰) نیز تأکید کردند که تجمع پرولین در بافت گیاهان تنش دیده به علت افزایش میزان سنتز به وسیله پیرولین - ۵-کربوکسیلاز-سنتتاز و کاهش میزان تجزیه آن به وسیله آنزیم پرولین اکسیداز است.

**محتوای گلوکز:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری و اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای گلوکز اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). در رابطه با اثرهای متقابل نیز مشخص شد که تمام اثرهای متقابل دوگانه و اثر سه جانبه آبیاری× اسید فولیک× نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای گلوکز اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). مقایسه محتوای گلوکز در پاسخ به کاربرد آبیاری × اسید فولیک × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نشان داد که در شرایط ۵۰٪ آب قابل دسترس بالاترین میانگین (۵۸/۲۶ میلی‌گرم بر گرم) با کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کمترین میانگین در شرایط ۵۰٪ آب قابل دسترس (۲۶/۶۶ میلی‌گرم بر گرم) با عدم کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک بدست آمد (جدول ۴).

**محتوای فروکتوز:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که اثرهای ساده، متقابل دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای فروکتوز اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). مقایسه محتوای فروکتوز در پاسخ به کاربرد آبیاری × اسید فولیک × نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نشان داد که در شرایط ۵۰٪ آب

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]
[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

قابل دسترس بالاترین میانگین (۳۶/۰۹ میلی‌گرم بر گرم) با کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کمترین میانگین در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس (۲۱/۲۸ میلی‌گرم بر گرم) با عدم کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید فولیک بدست آمد (جدول ۴).

**محتوای ساکارز:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری و اسید فولیک در سطح احتمال۱٪ بر محتوای ساکارز معنی‌دار بودند و از میان اثرهای متقابل تنها اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × اسید فولیک× نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح ۵٪ معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه محتوای ساکارز نشان داد که در شرایط ۵۰ ٪ آب قابل دسترس بالاترین میانگین (۱۲/۱۱ میلی‌گرم بر گرم) با کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کمترین میانگین در شرایط ۷۵٪ آب قابل دسترس (۴/۶۹ میلی‌گرم بر گرم) با عدم کاربرد اسید فولیک و ۱ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بدست آمد (جدول ۴). در شرایط تنش خشکی آب قابل دسترس گیاه کاهش می‌یابد و برای حفظ محتوای آب درونی روزنه‌های برگ بسته می‌شود که این امر منجر به کاهش جذب و تثبیت $CO_2$، بازداری از فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و تغییر در متابولیسم قندها می‌گردد (Flexas *et al.*, 2004). با وجود کاهش تثبیت کربن در برگ‌های تحت تنش خشکی مقدار زیادی کربوهیدرات محلول در آب مانند گلوکز، فروکتوز، ساکارز، استاکیوز مانیتول و پینیتول تجمع می‌یابند. البته نوع کربوهیدرات‌های محلول در بین گونه‌ها متغیر است (Valliyodan and Nguyen, 2006). کربوهیدرات‌های محلول و سایر املاح مانند پرولین به عنوان اسمولیت‌ها برای نگهداری تورژسانس سلول، برگ حفاظت غشاء و جلوگیری از دناتوره شدن پروتئین نقش دارند (Bartels and Sunkars, 2004). کربوهیدرات‌های محلول ساکارز، فروکتوز و گلوکز (نقش اصلی در متابولیسم گیاه در سطح سلولی و گیاه کامل ایفاء می‌کنند آنها علاوه بر منبع انرژی، در واکنش بـه تنش‌های غیرزنده شرکت می‌کنند و به عنوان پیام‌رسان‌های اولیه سیگنال‌هایی را تنظیم می‌کنند که در کنترل بیان ژن‌های مختلف درگیر در متابولیک نقش دارند (Price *et al.*, 2004). بررسی‌های فیزیولوژیکی نشان داده است که قندهایی از قبیل رافینوز گروه اولیگوساکاریدها، ساکارز، فروکتوز ترهالوز و سوربیتول قندهای الکلی از قبیل مانیتول، اسیدهای آمینه از قبیل پرولین و آمین‌ها از قبیل گلاسین بتائین و پلی‌آمین‌ها تحت تنش خشکی در گونه‌های گیاهی مختلف تجمع می‌یابند ( Rezapor *et al.*, 2011). در پژوهشی کاربرد نانوکود فارمکس و اسید فولیک باعث افزایش عملکرد و میزان مواد مؤثره سیاه‌دانه شد. از این‌رو به نظر می‌رسد فراهم بودن بیشتر عناصر غذایی برای گیاه در تیمارهای کودی باعث افزایش تولید مواد فتوسنتزی شده است (Piccolo *et al.*, 1993).

**پروتئین برگ:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که اثرهای آبیاری و اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای پروتئین برگ اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). در رابطه با اثرهای متقابل نیز مشخص شد که اثر متقابل اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اثر متقابل آبیاری و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان پروتئین برگ در سطح احتمال ۱٪ اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). کاربرد تیمار ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین میزان پروتین برگ (۴/۷۴ mg/gr fw) و تیمار عدم مصرف اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم کمترین (۳/۵۸ mg/gr fw) میزان پروتین برگ را نشان داد (جدول ۵). همچنین اعمال تیمار ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس (۴/۵۷ mg/gr fw) و عدم مصرف نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۷۵٪ آب قابل دسترس (۳/۸۱ mg/gr fw) میزان پروتین برگ را نشان داد (جدول ۶). نتایج پژوهشی در مورد بررسی اثرهای نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید فولیک بر ارقام کنجد در شرایط تنش خشکی نشان داد که قطع آبیاری در ۵۰٪ گلدهی کمترین عملکرد دانه و عملکرد پروتئین را داشت. بیشترین درصد و عملکرد پروتئین و کلروفیل در گیاهان محلول‌پاشی شده با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم همراه با اسید

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

**جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر پروتئین برگ، میزان روغن و درصد اسانس**

| اسید فولیک | نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم | پروتئین برگ (mg/gr fw) | میزان روغن (٪) | درصد اسانس (٪) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۰ | ۳/۵۸ h | ۳۷/۵۷d | ۰/۹۰ g |
| | ۱ | ۳/۹۷ f | ۳۸/۶۷c | ۱/۱۷ f |
| | ۲ | ۴/۲۰ de | ۳۹/۳۳b | ۱/۵۴ c |
| ۲۵۰ | ۰ | ۳/۸۵ g | ۳۵/۵۶ g | ۱/۱۹ f |
| | ۱ | ۴/۲۶ d | ۳۶/۱۹ f | ۱/۳۲ e |
| | ۲ | ۴/۷۴ a | ۳۶/۷۲ e | ۱/۵۷ c |
| ۵۰۰ | ۰ | ۴/۱۴ e | ۳۷/۹۹ d | ۱/۴۲ d |
| | ۱ | ۴/۳۸ c | ۴۰/۵۸ a | ۱/۷۸ b |
| | ۲ | ۴/۵۳ b | ۴۰/۶۱ a | ۱/۹۷ a |

**در هر ستون، میانگین‌های با حروف مشابه در سطح ۵٪ آزمون LSD با یکدیگر اختلاف ندارند.**

**جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر پروتئین برگ، میزان روغن و درصد اسانس**

| آبیاری | نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم | پروتئین برگ (mg/gr fw) | میزان روغن (٪) | درصد اسانس (٪) |
|---|---|---|---|---|
| ۵۰ | ۰ | ۳/۸۳ e | ۳۶/۰۷ e | ۱/۱۷ f |
| | ۱ | ۴۰/۰۸ c | ۳۸/۲۱ c | ۱/۳۲ e |
| | ۲ | ۴/۳۵ b | ۳۸/۷۱ b | ۱/۵۷ c |
| ۷۵ | ۰ | ۳/۸۱ e | ۳۷/۶۸ d | ۱/۱۴ f |
| | ۱ | ۴/۱۳ c | ۳۸/۴۰ c | ۱/۴۱ d |
| | ۲ | ۴/۵۴ a | ۳۸/۷۱ b | ۱/۶۷ b |
| ۱۰۰ | ۰ | ۳/۹۴ d | ۳۷/۷۸ d | ۱/۱۹ f |
| | ۱ | ۴/۴۰ b | ۳۸/۸۳ b | ۱/۵۴ c |
| | ۲ | ۴/۵۷ a | ۳۹/۲۴ a | ۱/۸۳ a |

**در هر ستون، میانگین‌های با حروف مشابه در سطح ۵٪ آزمون LSD با یکدیگر اختلاف ندارند.**

فولیک مشاهده شد (ایوبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). در رابطه با افزایش پروتئین با محلول‌پاشی اسید فولیک می‌توان گفت، اسید فولیک باعث افزایش نفوذپذیری غشای یاخته‌های ریشه، جذب و انتقال نیتروژن را بهبود بخشیده و باعث افزایش میزان پروتین در گیاه می‌شود (Mahrokh and Azizi, 2014).

**میزان روغن:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که اثرهای آبیاری و اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر میزان روغن اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). در رابطه با اثرهای متقابل نیز مشخص شد که اثر متقابل اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اثر متقابل آبیاری و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم برمیزان روغن در سطح احتمال ۱٪ اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). کاربرد تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین ۴۰/۶۱ درصد روغن را نشان داد ( جدول ۵).

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

همچنین اعمال تیمار ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس بیشترین ۳۹/۲۴ درصد و عدم مصرف نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۵۰٪ آب قابل دسترس کمترین ۳۶/۰۷ درصد روغن را نشان داد (جدول ۶).

**درصد اسانس:** براساس نتایج تجزیه واریانس مشخص گردید که اثرهای آبیاری و اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۱٪ بر درصد اسانس اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). در رابطه با اثرهای متقابل نیز مشخص شد که اثر متقابل اسید فولیک و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اثر متقابل آبیاری و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر درصد اسانس در سطح احتمال ۱٪ اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). کاربرد تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین ۱/۹۷ درصد و تیمار عدم‌مصرف اسید فولیک و عدم‌مصرف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم کمترین ۰/۹۰ درصد اسانس را نشان داد (جدول ۵). همچنین اعمال تیمار ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۱۰۰٪ آب قابل دسترس بیشترین ۱/۸۳ درصد و عدم‌مصرف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط ۷۵٪ آب قابل دسترس کمترین ۱/۱۴ درصد میران درصد اسانس را نشان داد ( جدول ۶). نانو ذرات با تأثیر بر تولید پراکسید هیدروژن همانند یک الیسیتور تولید اسانس در گیاهان را تحریک می‌کند. پراکسید هیدروژن در غلظت کم به عنوان یک سیگنال عمل کرده و مسیرهای دفاعی و سنتز متابولیت‌های ثانویه در گیاهان را فعال می‌کند (Marslin *et al.*, 2017). مشابه با نتایج این تحقیق اثر نانو ذرات اکسید مس بر تولید مواد فنلی در ریحان گزارش شده است (Nazir *et al.*, 2021).

## نتیجه‌گیری

افزایش تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پرکسیداز دیسموتاز و پرولین شد میزان فعالیت آنزیم‌های در تیمارهای تنش خشکی با عدم استفاده از اسید فولیک و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بالاتر از شرایط بدون تنش بوده است. در تیمار ۵۰٪ تنش خشکی میزان کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، گلوکز، فروکتوز و ساکارز بالا رفت زیرا افزایش تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پرکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، پرولین و قندها شد. تنش خشکی منجر به کاهش میزان اسانس، درصد روغن و پروتئین برگ شد. در تیمار تنش خشکی، ۵۰٪ با کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید فولیک و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بالاترین اعداد در صفات، گلوکز فروکتوز و ساکارز بدست آمد. بطورکلی بر اساس نتایج این آزمایش می‌توان گفت که استفاده از کود اسید فولیک به میزان ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در راستای کاهش اثرهای تنش بر گیاه سیاه‌دانه پیشنهاد می‌گردد.

## منابع

ایوبی‌زاده، نیکی، لایی، قنبر، امینی دهقنی، مجید، سینکی، جعفرمسعود، و شهرام، رضوان (۱۳۹۷). اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و اسید فولیک بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیک ارقام کنجد در شزایط تنش خشکی. *فیزیولوژی گیاهان زراعی*، *۱۰*(۴۰)، ۵۵-۷۴.

قلی‌نژاد، اسماعیل، و رضایی چیانه، اسماعیل (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در کشت مخلوط با نخود (*Cicer arietinum* L.). *مجله علوم گیاهان زراعی*، *۱۶*(۳)، ۲۳۶-۲۴۹.

خرم‌دل، سرور، کوچکی، علیرضا، نصیری محلاتی، مهدی، وقربانی، رضا (۱۳۸۷). اثر کاربرد کودهای بیولوژیک بر شاخص‌های رشد سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.). *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، *۶*(۲)، ۲۹۴-۲۸۵. DOR: 20.1001.1.20081472.1387.6.2.8.1.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

مظفری، افشین، حبیبی، داوود، اصغرزاده، احمد، و مشهدی اکبر بوجار، مسعود (۱۳۹۵). بررسی تحمل به تنش خشکی دو رقم گندم تلقیح شده با رایزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) تحت شرایط گلخانه. *مجله فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۳۱، ۲۱-۳۹.

Ahmad, B., Shabbir, A., Jaleel, H., Khan, M. M. A., & Sadiq, Y. (2018). Efficacy of titanium doxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and qualityin *Mentha piperita* L. *Current Plant Biology*, *13*, 6-15. https://doi.org/10 .1016/j.cpb.2018.04.002

Ait Mbarek, L. H., Ait Mouse, N., Elabbadi, M., & Zyad, A. (2007). Anti-tumor properties of black seed (*Nigella sativa* L.) extracts. *Medician Biological Research*, *40*(6), 839-847.

Bartels, D, & Sunkars, R. (2004). Drought and salt tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Science*, *24*, 23-58. https://doi.org/10-1080/07352680590910410

Bates, L. S., Waldern, R. P., & Teave, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207.

Chance, B, &Maehly, A. (1995). Assay of catalases and peroxidases. *Methods Enzymology*, *2*, 764-775. https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14

Chaves, M. M., Pereira, J. S., Maroco, J., Rodrigues, M. L., Ricardo, C. P. P., Osorio, M. L., Carvalho, I., Faria, T., & Pinheiro, C. (2002). How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, *89*(7), 907-916. https://doi.org/10.1093/aob/mcf105

Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, *6*, 1-11. https://doi.org/10.1075/s-2004-820867

Giannopolities, C. N, & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutase:I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, *59*, 309-314.

Hosseini Boldaji, S. A., Khavari-Nejad, R. A., Hassan Sajedi, R., Fahimi, H., & Saadatmand, S. (2012). Water availability effects on antioxidant enzyme activities lipid peroxidation, and reducing sugar contents of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Acta Physiologia Plantarum*, *34*, 1177-1186. https://doi.org/10.1007/s11738-011-0914-6

Kellos, T., Timar, L., Szilagyi, V., Szalai, G., Galiba, G., & Kocsy, G. (2008). Effect of abiotic stress on antioxidants in maize. *Plant Biology*, *10*(5), 563-572. https://doi.org/10.1111/j-14838-8677.2008.00071.x

Mac-Adam, J. W., Nelson, C. J., & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue. *Plant Physiology*, *99*, 872-878. https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872

Maccarthy, P. (2001). The principles of humic substances. *Journal Soil Science*, *166*, 738-751.

Mahrokh, A, & Azizi, F. (2014).The effect of natural zeolite usage on deficit irrigation stress tolerancein maize (*Zea mays*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(2), 296-340. https://doi.org/10.22067/GSC.V1212.21125

Manivannan, P., Jaleel, C. A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2008). Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Compets Rendus Biologies*, *331*(6), 418-425. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.03.003

Marslin, G., Shecba, C. J., & Franklin, G. (2017). Nanoparticales alter secondary metabolism in plants via ROS burst. *Frontier in Plant Science*, *8*, 832. dio:10.3398/fpls

McCready, R. M., Guggolz, J., Silviera, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylase in vegetables. *Analytical Chemistry*, *22*(9), 1156-1158.

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. ( 2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*(11), 1527-1536. https://doi.org/10.16/s0038-0717(02)00174-8

Nazir, S., Jan, H., Zaman, G., Khan, T., & Abbasi, B. H. (2021). Copper oxide (cuo) and manganes oxid (mno) nanoparticles induced biomass accumulation, antioxidants biosynthesis and abiotic elicitation of bioactive componds in callus cultures of *Ocimum basilicum*. *Artificial Cella, Nanomedicine and Biotechnology*, *49*, 625-633. https://doi.org/10.1080/2169140.2021

Neuman, K. H., Kumar, A., & Imani, J. (2009). Plant Cell and Tissue Culture. A Tool in Biotecnology.Springer- Verlag Berlin heideberg. https://doi.org/10.1007/978-3-03-49098-0

Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S., & Giannakoula, A. (2012). Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, *60*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.014

Phutela, A., Jain, V., Dhawan, K., & Nainawatee, H. S. (2000). Proline metabolism under water stress in the leaves and roots of *Brassica juncea* cutltivars differing in drought tolerance. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, *9*, 35-39. https://doi.org/10.1007/bf.3263.810

Piccolo, A., Celanoand, G., & Pietramellara, G. (1993). Effects of fractions of coal-derived folic substances on seed germination and growth of seedlings (*Lactuca sativa* and *Lycopersicon esculentum*). *Biology and Fertility of Soil*, *16*, 11-15.

Price, J., Laxmi, A. S., Martin, S. K., & Jang, J. C. (2004). Global transcription profiling reveals multiple sugar signal

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

transduction mechanisms Arabidopsis. *The Plant Cell*, *16*(8), 2128-2150. https://doi.org/10.1105/tpc.104.02616

Reddy, A. R., Chaitanya, K. V., & Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, *161*(11), 1189-1202. https://doi.org/10.106/j.jpLph.2004.01.013

Reynods, G. H. (2002). Forward to the Furture Nanotechnology and Regulatory Policy. Pacific Research Institute.

Rezapor, A., Heidari, M., Galavi, M., & Ramrodi, M. (2011). Effect of water stress and different amounts of sulfur fertilizer on grian yield, grain yield components and osmotic adjustment in *Nigella sativa* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *27*(3), 384-396. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2011.638

Sebastiano, D., Roberto, T., Ersilio, D., & Arturo, A. (2005). Effect of foliar application of N and folic acids on growth and yield of durum wheat. *Jonural Agricultural Research*, *25*, 183-191. https://doi.org/10.1051/agro.2005017

Sequera-Mutiozabal, M., Tiburcio, A. F., & Alcazar, R. (2016). Drought stress tolerance in relation to polyamine metabolism in plants. In: Drought Stress Tolerance in Plants (eds. Hossain, M. A., Wani, S. H., Bhattacharjee, S., Burritt, D. J. and Lam-Son, P. T.) Pp. 267-286. Springer International Publishing.

Soleimani, Z., Safipoorafshar, A., & Bahrami, A. (2012). Expression of superoxide dismutase gene in Cumin (*Cuminum cyminum* L.) under salinity stress. 12th Congress of Iranian Genetics Society, Tehran, 21 May.

Soltani, M., Moaveni, P., & Noori, H. (2013). The effect of folira application of nanoparticles of titanium dioxide yield and antioxidant enzyme activities in lentil (*Lens culinaris* L.). *Journal of Plant Ecophysiology Research Special Issue*,78-88.

Sungkaworn, T., Triampo, W., Nalakarn, P., Triampo, D., Tang, I. M., & Lenburt, Y. (2007). The effects of $TiO_2$ nanoparticles on tumor cell colonies: Fractal dimension and morphological properties. *International Journal of Biomedical Scinec*, *2*(1), 67-74.

Tavakoli, M., Poustini, K., & Alizadeh, H. (2016). Proline accumulation and related genes in wheat leaves under salinity stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *18*, 707-716.

Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., & Nardi, S. (2010). Humic substances biological activity at the plant-soil interface. *Plant Signaling and Behavior Journal*, *5*(6), 635-643. https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11211

Ullah, S., Adeel, M., Zain, M., Jilani, Gh., & Hamed, A. (2020). Physiological and biochemical response of wheat (*Triticum aestivum*) to $TiO_2$ nanoparticels in phosphorous amended soil: A full life cycle study. *Journal of Environment Management*, *263*, 110365. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110365

Valliyodan, B, & Nguyen, H. T. (2006). Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, *9*(2), 189-195. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.019

Vaseghi, A, & Davarzadehmami, S. (2016). Comparison of seed oil and mineral content of Guizotia abyssica Cass.with two genoyypes of Iranian and Indian *Nigella sativa* L. *Journal of Oil Plants Production*, *2*(2), 13-24.

Zheng, Y., Graham, T. Richard, S., & Dixon, M. (2004). Potted gerbera production in a sub-irrigation system using low-concentration nutrient solutions. *Hort Scientist*, *39*(6), 1283-1286.

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]

# Investigating of the effect of folic acid and titanium dioxide nanoparticles on phytochemical characteristics of Black cumin (*Nigella sativa* L.) under water stress conditions

**Saedeh rashidy**

**Department of Agriculture, Payam Noor University, Tehran, Iran**
**(Received: 2024/12/22, Accepted: 2025/02/24)**

**Abstract**

Black seed (*Nigella sativa* L.) is one of the best sources of natural antioxidants with compounds such as alkaloids, flavonoids and tannin. Black seed plant seeds are used in traditional medicine of many countries to prevent and treat disorders and diseases. Since the production of medicinal plants can be affected by environmental factors such as water limitation, an experiment was conducted to investigate the effect of folic acid and titanium dioxide nanoparticles under drought stress conditions on phytochemical characteristics including the percentage of essential oil, oil content, leaf protein, glucose, fructose, sucrose, proline, superoxide dismutase, catalase and peroxidase of black seed medicinal plants. It was carried out during two crop years of 2018 and 2019 in the research farm of Shahrood University of Technology. This experiment was conducted as a split factorial in the form of a randomized complete block design with three treatments in three replications. The main plot consisted of three levels of irrigation (50, 75, and 100% of available water) and sub-plots included folic acid (0, 250 and 500 mg/l) and titanium dioxide nanoparticles (0, 1, and 2 mg/l). The results showed that the effect of irrigation treatments, folic acid and titanium dioxide nanoparticles on the content of catalase, superoxide dismutase, glucose and peroxidase, the effect of irrigation treatments on proline content and the effect of irrigation treatments and folic acid on the content of sucrose and fructose were significant. In the treatment of 50% drought stress, the amount of catalase (4.84 Unit/mg pro), peroxidase (61.2 Unit/mg pro), superoxide dismutase (61.3 Unit/mg pro), proline (16.85 mg/gr), glucose (52.61 mg/gr), fructose (31.08 mg/gr) and sucrose (9.80 mg/gr) went up. In the treatment of 50% drought stress with 500 mg per liter of folic acid and 2 mg per liter of titanium dioxide nanoparticles, the highest amounts of glucose (58.26 mg/gr), fructose (36.09 mg/gr) and sucrose (12.11 mg/gr) were obtained. Also, the results showed that drought stress led to a decrease in essential oil, oil percentage and leaf protein. The highest percentage of essential oil, percentage of leaf oil, and protein was observed with the use of 500 mg/L of folic acid and 2 mg/l of titanium dioxide nanoparticles with 100% water. Overall, based on the results of this experiment, it is recommended to use folic acid fertilizer (500 mg/l) and titanium dioxide nanoparticles (2 mg/l) in order to reduce the effects of drought stress on black cumin.

**Keywords**: Catalase, Peroxidase, Proline, Folic acid, Fructose

Corresponding author, Email: rashidi@pnu.ac.ir

[ Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-02-26 ]

[ DOI: DOI: 10.22034/14.66.1 ]