**مقاله علمی پژوهشی**
مجله دوفصل نامه
**مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی**
**ISSN 2588-5073** چاپی
**ISSN 2588-5081** الکترونیکی online
**دوره ۱٤، شماره ۱، بهار و تابستان ۱٤۰٤**
**صفحه ۳۵-۱۹**

Research Article
**Genetic Engineering and Biosafety Journal 2025**
Volume 14, Number 1, Pages: 19-35

http://gebsj.ir/

https://ecc.isc.ac/showJournal/23064

10.61882/gebsj.14.1.2

# بررسی تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های تشریحی و بیوشیمیایی گیاه گل ناز یخی (*Aptenia cordifolia*) در مراحل مختلف تکوینی

# Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Anatomical and Biochemical Characteristics of *Aptenia cordifolia* at Different Developmental Stages

معصومه بهلی بهل[۱]، هانیه محجل شجاء[۲*]، سمیرا بهبودی[۳**]، سعیده علیزاده سالطه[٤]

**Masoumeh Bohli-Bohl[1], Hanieh Mohajjel Shoja[2*], Samira Behboudi[3], Saeideh Alizadeh-Salteh[4]**

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- دانشجوی کارشناس ارشد، گروه زیست شناسی گیاهی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران. ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، گرایش گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

1. Ph.D. student, 2. Assistant Professor, 3. M.Sc. student, Department of Plant Biology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran.
4. Associate Professor, Department of Plant Physiology, Department of Crop Physiology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

** این مقاله حاصل پژوهشهای پایان نامه های کارشناسی ارشد نفر اول و نفر سوم می باشد و هر دو به یک میزان در انجام پژوهش سهم دارند.

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: *Corresponding Author, Email
mohajelh@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۶ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱۷- تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۶/۲۹)
Received: 2025/05/06 | Accepted: 2025/08/08 | Published: 2025/09/20

## چکیده

**Abstract**

Titanium dioxide nanoparticles ($TiO_2$) have gained attention for their photocatalytic properties and broad applications in life sciences and agriculture. However, their impact on plant growth and development remains a topic of ongoing debate. This study, utilizing a completely randomized design, investigated the effects of foliar-applied $TiO_2$ at concentrations of 0, 0.03%, and 0.05% on the growth, morphology, and biochemical traits of *Aptenia cordifolia* during its vegetative and reproductive stages. The results indicated that $TiO_2$ treatments reduced growth parameters, such as stem length, root length, and leaf area, during both vegetative and reproductive stages compared to controls. However, plants treated with 0.03% $TiO_2$ exhibited significantly higher fresh and dry weights of roots and shoots, as well as greater stomatal density, compared to those treated with 0.05%, suggesting a potential inhibitory effect of the higher concentration. In the vegetative stage, the 0.03% treatment increased photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, total chlorophyll, and carotenoids) and peroxidase activity, while in the reproductive stage, these increases were observed with the 0.05% treatment. Additionally, the 0.05% $TiO_2$ treatment led to an increase in protein content in both stages. These findings demonstrate that the effects of $TiO_2$ are concentration- and growth stage-dependent, with lower concentrations enhancing biochemical properties, while higher concentrations adversely affected plant growth and metabolism. Therefore, careful consideration of nanoparticle concentration and application methods is essential for optimizing their effectiveness in agricultural applications.

**Key words:** Antioxidant enzymes, growth parameters, photosynthetic pigments, reproductive stage, vegetative stage

**رفرانس دهی این مقاله Citation**

Bohli Bohl M, Mohajjel Shoja H, Behboudi S, Alizadeh-Salteh S. (2025). Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Anatomical and Biochemical Characteristics of *Aptenia cordifolia* at Different Developmental Stages. Genetic Engineering and Biosafety Journal, 14 (1): 19-35. Doi: 10.61882/gebsj.14.1.2
URL: http://gebsj.ir/article-1-511-en.html

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

**Genetic Engineering and Biosafety Journal**
**Volume 14, Number 1, 2025**

**خلاصه**

در سال‌های گذشته، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ($TiO_2$) به دلیل خواص فتوکاتالیستی و کاربردهای گسترده در علوم زیستی و کشاورزی، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. با این حال، تاثیر آن‌ها بر رشد و تکوین گیاهان همچنان محل بحث است. مطالعه حاضر بر پایه یک طرح تصادفی به بررسی مقایسه‌ای تأثیر غلظت‌های مختلف $TiO_2$ (۰، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد) به صورت محلول‌پاشی برگی، بر پارامترهای رشدی، ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گل ناز یخی (*Aptenia cordifolia*) در مراحل رشد رویشی و زایشی پرداخته است. نتایج نشان داد در مرحله رویشی و زایشی تیمار نانوذرات موجب کاهش پارامترهای رشدی شامل طول ساقه، طول ریشه و سطح برگ نسبت به گیاهان شاهد شد اما وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و تراکم روزنه‌ها در هر دو مرحله در تیمار ۰/۰۳ بیشتر از ۰/۰۵ درصد بود که به طور کلی تاثیر منفی تیمار ۰/۰۵ درصد را بر این پارامترها نشان می‌دهد. در مرحله رویشی تیمار ۰/۰۳ و در مرحله زایشی تیمار ۰/۰۵ درصد باعث افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئید) و آنزیم آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز شد. همچنین افزایش محتوای پروتئین در غلظت ۰/۰۵ درصد در هر دو مرحله مشاهده شد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اثر این نانوذرات وابسته به غلظت و مرحله رشدی گیاه بوده و در غلظت‌های پایین باعث بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه شد، در حالی که در غلظت‌های بالاتر تاثیر منفی بر رشد و متابولیسم گیاه مشاهده شد. پیشنهاد می‌شود در کاربرد نانوذرات، غلظت‌های بهینه، موثر و روش استفاده آن‌ها مورد توجه قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پارامترهای رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، مرحله رویشی، مرحله زایشی

## مقدمه Introduction

نانوذرات (NPs) جرم‌های اتمی یا مولکولی با ابعاد کامل بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر مربع هستند که خواص فیزیکوشیمیایی متفاوتی دارند (Nasrollahzadeh *et al*., 2019). در دهه‌های گذشته، نانومواد مهندسی‌شده به طور گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف صنعتی، پزشکی، کشاورزی و مصرف روزمره وارد شده‌اند. این گسترش موجب ورود مقادیر زیادی از این مواد به محیط زیست از طریق خاک، آب و هوا شده که می‌تواند منجر به انتقال آن‌ها به گیاهان، زنجیره غذایی و در نهایت، اثرگذاری بر سلامت انسان شود. نگرانی‌ها در مورد پیامدهای بالقوه NPs بر محیط زیست و سلامت عمومی به طور چشمگیری افزایش یافته‌است (Leopold *et al*., 2022).

در بین NPs فلزی، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ($TiO_2$) به‌دلیل خواص منحصر به‌فردی مانند پایداری نوری، فعالیت فتوکاتالیستی بالا، سهولت دسترسی و قیمت پایین، کاربردهای فراوانی دارند (Kushwah *et al*., 2020). این نانوذرات یکی از پرمصرف‌ترین NPs در جهان محسوب می‌شوند که سالانه تا ۲ میلیون تن از آن‌ها در جهان تولید می‌شود. از جمله کاربردهای $TiO_2$ در صنایعی مانند خمیردندان، داروسازی، پوشش‌ها، کاغذ، جوهر، پلاستیک، محصولات غذایی، لوازم آرایشی و نساجی می‌توان نام برد (Waghmode *et al*., 2019).

پاسخ گیاهان به NPs فلزی با توجه به ویژگی‌های NPs (اندازه، شکل، غلظت و زمان قرار گرفتن در معرض NPs)، گونه گیاهی و مرحله رشد گیاهان متفاوت است (Dağhan, 2018). یکی از اثرهای مثبت $TiO_2$ افزایش رشد محصول از طریق افزایش فعالیت فتوسنتزی و افزایش جذب مواد مغذی است (Ko and Hwang, 2019). $TiO_2$ اثر مطلوبی بر تولید ماده خشک و برخی خواص آنتی‌اکسیدانی و بیوشیمیایی گیاه پنج انگشت (*Vitex agnus*) (Farahi *et al*., 2023) و همچنین رزماری (Gholami *et al*., 2020) داشت. افزایش عملکرد کاه و دانه، محتویات



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

کلروفیل، ارتفاع بوته و کاهش تنش اکسیداتیو تحت تنش کادمیوم با به کار بردن $TiO_2$ در گیاه گندم مشاهده شد (Irshad *et al*., 2021). تنش‌های محیطی، مانند خشکی در گندم (Mustafa *et al*., 2021) و سطوح بالای کادمیوم در ذرت (Lian *et al*., 2020) نیز با استفاده از $TiO_2$ به طور قابل توجهی کاهش یافتند.

با این حال، پژوهش‌های متعددی اثرهای منفی و سمی $TiO_2$ را نیز گزارش کرده‌اند. این اثرها به طور معمول در غلظت‌های بالا مشاهده می‌شوند و شامل افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آسیب به ساختارهای سلولی، تخریب کلروفیل و اختلال در فرایندهای فتوسنتزی هستند (Gohari *et al*., 2020). استفاده از $TiO_2$ در گیاه گندم باعث اختلال در فازهای وابسته به نور و مستقل از فتوسنتز، کاهش محتوای کلروفیل a، سرعت تعرق، هدایت روزنه، غلظت $CO_2$ بین سلولی و محتوای نشاسته شده است (Dias *et al*., 2019). همچنین اثر سمی $TiO_2$ در گیاهان پیاز (Santos *et al*., 2019)، تنباکو (Hou *et al*., 2019)، گندم (Silva *et al*., 2019) و سورگوم (Daryabeigi Zand and Vaezi Heir, 2022) نیزگزارش شده است. با این حال، بسیاری از آزمایش‌ها در شرایط هیدروپونیک انجام شده است و آزمایشات کمی در شرایط خاک انجام شده است. همچنین محلول‌پاشی نانوذرات نسبت به اعمال از طریق خاک، در جذب نانوذرات در گیاهان مؤثرتر است (Hong *et al*., 2021). بیشتر مطالعات پیشین روی گیاهان زراعی رایج مانند ذرت، گندم و برنج متمرکز بوده و بررسی‌های محدودی در مورد گونه‌های با متابولیسم CAM انجام شده است. گیاه گل ناز یخی با نام علمی (*Aptenia cordifolia L.*)، از تیره Aizoaceae، با سازگاری بالا به خشکی و کاربردهای دارویی (خاصیت ضدالتهابی، ضد میکروبی و خوشبوکننده) و زینتی، می‌تواند به عنوان مدلی مناسب برای ارزیابی اثر $TiO_2$در محیط‌های دشوار زیستی مورد استفاده قرار گیرد(Said *et al*., 2019; Lahuf *et al*., 2018 ). با این حال، تاکنون مطالعه‌ای که به طور همزمان تأثیر محلول‌پاشی$TiO_2$ را در مراحل رویشی و زایشی این گونه بر پارامترهای رشدی، مورفولوژیکی و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی بررسی کند، گزارش نشده است. شناخت دقیق واکنش‌های گیاه به دوزهای متفاوت نانوذرات در مراحل رشد مختلف، می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای کاربرد ایمن و مؤثر فناوری نانو در کشاورزی باشد. در پژوهش پیشین، ویژگی‌های مورفولوژیکی و بیوشیمیایی این گیاه در شرایط هیدروپونیک بررسی شد (Mohajjel Shoja *et al*., 2021). بنابراین، در این پژوهش هدف ما بررسی اثر محلول‌پاشی $TiO_2$ از برگ *Aptenia cordifolia* در مراحل رویشی و زایشی با تأکید بر اندازه‌گیری پارامترهای رشدی و مورفولوژیک و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی است.

## مواد و روش‌ها Materials and Methods

**تهیه نانوذرات دی اکسید تیتانیوم ($TiO_2$):** نانوذرات $TiO_2$ از شرکت بازرگانی نوترینو به مقدار ۲۵ گرم تهیه شد. مشخصات این نانوذرات به شرح زیر است. وضعیت ظاهری: پودر سفید، اندازه متوسط نانوذره: ۳۰nm، سطح ویژه: $>200 m^2/g$، درصد خلوص: ۹۹/۹ درصد.

**تهیه سوسپانسیون در غلظت‌های مختلف $TiO_2$** : سوسپانسیون اصلی شامل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با غلظت ۲ میلی‌گرم در میلی‌لیتر بود که از طریق پراکنده ساختن نانوذرات در آب مقطر با قرار دادن آهن‌ربا درون سوسپانسیون به مدت یک ساعت روی دستگاه همزن مغناطیسی تهیه شد تا مانع آگلومره شدن نانوذرات گردد. به منظور انجام آزمایشات، غلظت‌های مختلفی از نانوذرات (۰، ۰/۰۳، ۰/۰۵ درصد وزنی-حجمی) از سوسپانسیون اصلی تهیه گردید و با آب مقطر به حجم معین رسانده شد و مجدد همگن‌سازی انجام شد. هر بار قبل از محلول‌پاشی سوسپانسیون از قبل تهیه شده، با آهن‌ربا مجدد روی همزن مغناطیسی هم زده شد تا از ته نشین شدن نانوذرات جلوگیری شود.

**کشت گیاهان و شیوه محلول‌پاشی:** بذر گل ناز یخی از موسسه پاکان بذر اصفهان تهیه شد. دانه رست‌های گل ناز یخی به گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۷ سانتی‌متر که حاوی خاک با ترکیبات کوکوپیت، پرلیت و پیت ماس بودند منتقل شدند. تیمار نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بعد از رسیدن گیاهان به مرحله ۸ برگی در یک طرح به طور کامل تصادفی در سه تکرار و سه غلظت (۰، ۰/۰۳،



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

۰/۰۵ درصد وزنی–حجمی) هر سه روز یک بار بر سطح رویی و پشتی برگ‌ها اسپری شد. در محلول‌پاشی گیاهان شاهد از اسپری آب مقطر استفاده شد. آبیاری با آب مقطر در حد ظرفیت مزرعه‌ای هر روز یک بار، به منظور حفظ رطوبت خاک، انجام شد. مطالعات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی بعد از گذشت ۲۱ روز پس از اعمال تیمار در مرحله رویشی و ۶۳ روز پس از اعمال تیمار در مرحله زایشی انجام گرفت.

**بررسی پارامترهای رشدی و ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه:** در بررسی پارامترهای رشدی مؤلفه‌هایی از قبیل طول اندام هوایی و ریشه، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و در بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی تعداد روزنه‌ها و سلول‌های ذخیره‌کننده آب اندازه‌گیری شد و از هر تیمار سه تکرار برداشته شد. طول ساقه از ناحیه‌ی یقه تا نوک جوانه انتهایی و طول ریشه از ناحیه‌ی یقه تا نوک ریشه به وسیله خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سطح برگ، از روش ترسیم برگ بر روی کاغذ میلی‌متری و شمارش تعداد خانه‌ها استفاده شد. برای مشاهده و شمارش تعداد روزنه‌ها و تراکم سلول‌های ذخیره‌کننده آب از لاک شفاف استفاده شد. به طوری که بعد از زدن مقداری لاک بر روی سطح اپیدرم رویی و زیرین و قرار دادن لاک‌های جدا شده از سطح برگ روی لام تعداد روزنه‌ها و تعداد سلول‌های ذخیره‌کننده آب در هر دو سطح رویی و زیرین برگ گیاه توسط میکروسکوپ نوری با عدسی X10 مشاهده و شمارش شد (Sun et al., 2020).

**بررسی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه:** مطالعات بیوشیمیایی شامل سنجش رنگیزه‌ها (کلروفیل a، b، کلروفیل‌کل و کاروتنوئید)، سنجش آنزیم–های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز) و محتوای پروتئین کل تحت تاثیر تیمار $TiO_2$ می‌باشد. تمامی این سنجش‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (METASH مدل UV-5100) اندازه‌گیری شد.

**اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و کارتنوئید:** اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و کارتنوئید به روش (Dere *et al*., 1998) انجام شد. مقدار ۰/۱ گرم از نمونه گیاهی در ۲ میلی‌لیتر استون ۱۰۰ درصد در یک هاون چینی سابیده شد و به مدت ۴۸ ساعت در تاریکی در یخچال نگهداری شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور سانتریفیوژ، انجام شد و فاز رویی را برداشته و جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۲ و ۴۷۰ نانومتر نسبت به شاهد اندازه‌گیری شد. از ۲ میلی لیتر استون به عنوان شاهد استفاده شد. غلظت کلروفیل طبق فرمول‌های زیر محاسبه شده و براساس میلی‌گرم بر گرم وزن تر گزارش شد. میزان کارتنوئید برای هر عصاره با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$C_a = 11.75\ A_{662} - 2.35\ A_{645}$$

$$C_b = 18.61\ A_{645} - 3.96\ A_{662}$$

$$C_{X+C} = 1000\ A_{470} - 2.27\ C_a - 81.4\ C_b\ /227$$

که در آن‌ها $C_a$: میزان کلروفیل a $C_b$: میزان کلروفیل b $C_{X+C}$: میزان کارتنوئید $A_{662}$: جذب در طول موج ۶۶۲

$A_{645}$: جذب در طول موج ۶۴۵ $A_{470}$: جذب در طول موج ۴۷۰ که مربوط به کارتنوئید کل می‌باشد.

**تعیین فعالیت آنزیم های آنتی‌اکسیدانی:** ۰/۱ گرم بافت برگ تازه با ۲ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی مولار) با PH ۷ در هاون چینی سابیده شد، عصاره در ۱۰۰۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول در فاز بالایی قرار گرفت که برای سنجش آنزیمی استفاده شد (De Azevedo Neto *et al*., 2006).

**تعیین فعالیت آسکوربات پراکسیداز (APX):** فعالیت APX از کاهش جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر به دلیل اکسیداسیون آسکوربات در واکنش تعیین شد. مخلوط واکنش شامل ۳۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی مولار)، ۲۰۰ میکرولیتر آسکوربات، ۲۰۰ میکرولیتر EDTA، ۲۰۰ میکرولیتر BSA، ۵۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ($H_2O_2$) و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. از لوله آزمایش فاقد آسکوربات و عصاره آنزیمی به‌عنوان شاهد استفاده شد. کاهش جذب آسکوربات در طول موج ۲۹۰ نانومتر هر ۳۰ ثانیه با اسپکتروفتومتر به مدت ۳ دقیقه اندازه‌گیری شد. $H_2O_2$ آخرین ماده برای شروع واکنش اضافه شد، برای محاسبه واحد آنزیمی از ضریب خاموشی ۲/۸ $mM^{-1}cm^{-1}$ استفاده شد و فعالیت آنزیم بر حسب $U\ mg^{-1}$ protein محاسبه شد (Sairam *et al*.,2002).



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

**تعیین فعالیت پراکسیداز (POD)**: گایاکول به عنوان بستر استفاده شد. فعالیت POD در یک مخلوط واکنش که حاوی ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۳۰۰ میکرولیتر $H_2O_2$ و ۳۰۰ میکرولیتر محلول گایاکول (۱۵۳ میکرولیترگایاکول در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) و۳۵۰ میکرولیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار، PH ۷ بود، اندازه‌گیری شد از لوله آزمایش فاقد عصاره آنزیمی به عنوان شاهد استفاده شد. در سراسر پلیمریزاسیون گایاکول، افزایش جذب در ٤٧٠ نانومتر به مدت ۳ دقیقه هر ۳۰ ثانیه ثبت شد، برای محاسبه واحد آنزیمی از ضریب خاموشی ۲۵/۵ $mM^{-1}cm^{-1}$ استفاده شد. فعالیت آنزیم بر حسب $U\ mg^{-1}$ protein محاسبه شد (MacAdam *et al*., 1992).

**اندازه‌گیری میزان پروتئین**: از روش سنجش پروتئین برادفورد استفاده شد. مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی برداشته و به آن ۱۰۰ میکرولیتر آب مقطر و ۱۰۰۰ میکرولیتر معرف برادفورد اضافه شد و بعد از مخلوط کردن و طی زمان ۱۰ دقیقه جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر نسبت به شاهد اندازه‌گیری شد از لوله آزمایش فاقد عصاره بعنوان شاهد استفاده شد. داده‌ها بر حسب $U\ mg^{-1}$ FW محاسبه شد (Bradford *et al*., 1976).

**تجزیه و تحلیل آماری**: تجزیه و تحلیل داده‌های آماری بر اساس طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SPSS 16 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال آماری P<۰/۰۵ انجام گرفت. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار EXCEL رسم شدند.

## نتایج و بحث
## Results and Discussion

### تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر پارامترهای رشدی و ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه گل ناز یخی

نتایج آزمون اختلاف معنی‌داری را در میان گیاهان مورد بررسی در مولفه‌های طول اندام هوایی (P<۰/۰۵ در مرحله رویشی و P<۰/۰۱ در مرحله زایشی)، طول ریشه (P<۰/۰۱)، سطح برگ (P<۰/۰۱)، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه (P<۰/۰۱) نشان داد. طول اندام هوایی در مرحله رویشی و زایشی در گیاهان شاهد بیشترین مقدار را داشت (به ترتیب ۹/۳۱ و ۱۷/۰۱ سانتی‌متر)، در حالی که تیمارهای ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند و نسبت به شاهد کاهش یافتند (شکل۱–A). بنابراین بیشترین مقدار طول اندام هوایی در هر دو مراحل رویشی و زایشی مربوط به گیاهان شاهد است و با قرار گرفتن گیاه در معرض $TiO_2$ این پارامتر کاهش پیدا کرده است. این نتایج با یافته‌های پژوهشگران در گیاه گندم (Amirjani *et al*., 2016) و همچنین گونه‌های لوبیا، کلزا و کاهو (Song *et al*., 2013) همخوانی دارد. در مقابل، برخی مطالعات نشان داده‌اند که $TiO_2$-NPs در گوجه‌فرنگی (Raliya *et al*., 2015b)، برنج (Zhang *et al*., 2020) و ماش (Raliya *et al*., 2015a) باعث افزایش ارتفاع گیاه شده‌اند. همچنین گزارش شده است که مهار رشد ساقه توسط $TiO_2$ در گیاهان بسیار متفاوت است و به غلظت نانوذات بستگی دارد. به طوری که مطالعه بر روی گیاه عدسک آبی نشان داده است که $TiO_2$ رشد گیاه را در غلظت‌های پایین تحریک کردند، اما در غلظت‌های بالا مهار کردند (Song *et al*., 2012). این احتمال وجود دارد در صورتی که در محلول‌پاشی غلظت NPs بیشتر باشد می‌تواند به سطوح سمی در ساقه و برگ رسیده باشد و ارتفاع گیاه را کاهش دهد (Raliya *et al*., 2015b). همچنین علت کاهش طول ساقه تحت تاثیر $TiO_2$ می‌تواند با کاهش شدید زیست توده اندام هوایی ارتباط داشته باشد (Samadi *et al*., 2014).

طول ریشه نیز در گیاهان شاهد در هر دو مرحله رویشی و زایشی بیشترین مقدار را داشت (به ترتیب ۱۰/۵۱ و ١٤/٧٤ سانتی‌متر) و با افزایش غلظت نانوذرات کاهش یافت. در مرحله رویشی، کمترین مقدار طول ریشه در تیمار ۰/۰۵ درصد (٦/٥٥ سانتی‌متر) مشاهده شد (شکل۱–B). این نتایج با یافته‌های انجام شده بر روی جو (Mattiello *et al*., 2015) و گوجه‌فرنگی (Raliya *et al*., 2015b) مطابقت دارد، اما در نخود (Hajra and Mondal, 2017) و ماش (Raliya *et al*., 2015a) افزایش طول ریشه در مواجهه با $TiO_2$ گزارش شده است. مطالعات نشان



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

داده‌اند که غلظت نانوذرات تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر طول ریشه دارد به طوری که در گیاه نعنا فلفلی تمام غلظت‌های $TiO_2$ باعث کاهش طول ریشه شدند درحالی‌که غلظت کمتر $TiO_2$ به طور معنی‌داری طول ریشه را افزایش داد (Samadi *et al*., 2014). کاهش رشد ریشه می‌تواند ناشی از مسدود شدن منافذ ریشه، کاهش جذب آب و مواد مغذی و یا سمیت سلولی باشد (Castiglione *et al*., 2011; Samadi *et al*., 2014). از دلایل احتمالی دیگر کاهش شاخصه‌های رشدی، تمایز زودرس و چوبی‌شدن دیواره سلول‌های واقع در منطقه رشد طولی سلول است (Fusconi *et al*., 2007).

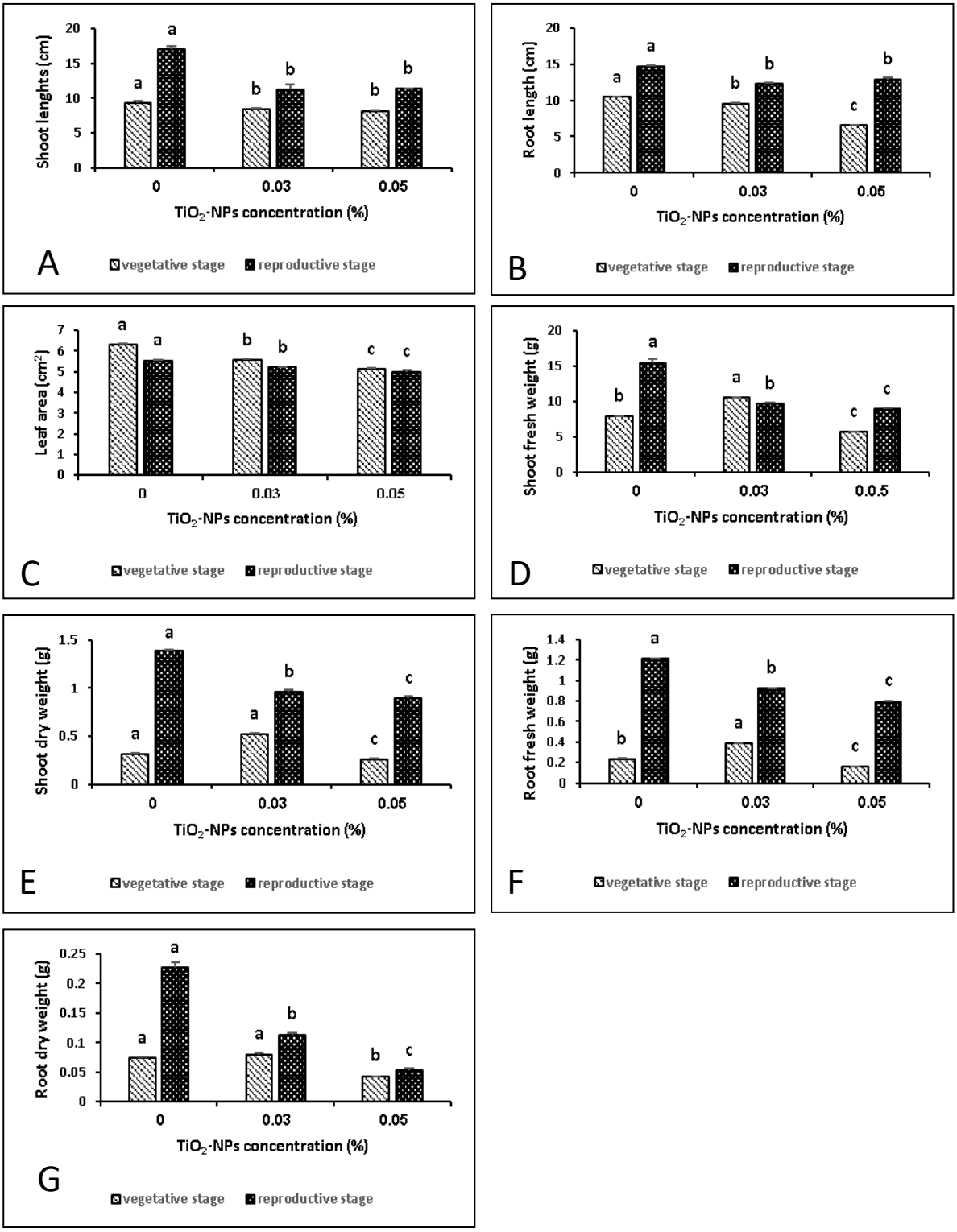
سطح برگ در مراحل رویشی و زایشی بیشترین مقدار را در گیاهان شاهد داشت (به ترتیب ٦/٣١ و ٥/٥٤ سانتی‌متر مربع)، درحالی‌که تیمار ۰/۰۵ درصد کمترین مقدار را نشان داد (به ترتیب ۵/۱۲ و ٤/٩٩ سانتی‌متر مربع) (شکل۱-C). این کاهش با نتایج حاصل از مطالعات در گیاه اسفناج همسو است (Nejatie Zadeh *et al*., 2018). همچنین مطالعه بر روی گیاه ذرت که در معرض تولیدات $TiO_2$ صنعتی قرار گرفتند کاهش سریع رشد برگ را نشان داده است (Asli and Neumann, 2009). با این حال، در برخی مطالعات، افزایش سطح برگ در غلظت‌های پایین $TiO_2$ گزارش شده است، مانند پژوهش در گیاه باقلا (Abdel Latef *et al*., 2018). کاهش سطح برگ ممکن است ناشی از تأثیر نانوذرات بر دیواره سلولی و فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه باشد، زیرا مطالعات گذشته نشان داده‌اند که $TiO_2$ با پر کردن فضای بین میکروفیبریل‌های سلولزی، تأثیر منفی بر رشد برگ، تعرق و فعالیت هیدروکسی ریشه دارند (Asli and Neumann, 2009; Feizi *et al*., 2011) در مطالعه‌ای که قبلا در محیط هیدروپونیک بر روی گل ناز یخی انجام دادیم نیز کاهش پارامترهای رشدی در گیاهان تحت تیمار $TiO_2$ نشان داده شده است (Mohajjel Shoja *et al*., 2021).

درمورد وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در مرحله رویشی بیشترین میزان مربوط به تیمار ۰/۰۳ درصد نانوذرات با مقادیر به ترتیب ۱۰/۵۸، ۰/۵۳، ۰/۳۸ و ۰/۰۸ گرم و کمترین میزان مربوط به تیمار ۰/۰۵ درصد نانوذرات با مقادیر به ترتیب ۵/٦٩، ۰/۲٦، ۰/۱۵ و ۰/۰٤۳ گرم است. اما در مرحله زایشی بیشترین میزان وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه مربوط به گیاهان شاهد به ترتیب با مقادیر ۱۵/٤٩، ۱/۳۹، ۱/۲۱ و ۰/۲۲ گرم و کمترین میزان مربوط به تیمار ۰/۰۵ درصد نانوذرات با مقادیر به ترتیب ۸/۹۲، ۰/۸۹، ۰/۷۹ و ۰/۰۵ گرم است (شکل۱-D,E,F,G). این یافته‌ها نشان می‌دهد که $TiO_2$ در یک غلظت مشخص می‌توانند موجب افزایش وزن گیاه شوند، اما در غلظت‌های بالاتر ممکن است اثر منفی بر رشد داشته باشند. در مطالعه‌ای روی گیاه ذرت، استفاده از $TiO_2$ موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه شد (Dağhan *et al*., 2018)، در حالی که در گیاهان گل ماهور (Ghasemlou *et al*., 2019) و نعنا فلفلی (Ahmad *et al*., 2018)، این نانوذرات به طور قابل توجهی وزن تر و خشک گیاهان تیمار شده را افزایش دادند. افزایش وزن تر می‌تواند به تأثیر $TiO_2$ در تحریک رشد ریشه، افزایش توانایی جذب آب و مواد مغذی و در نتیجه افزایش زیست‌توده اندام هوایی مرتبط باشد. همچنین، $TiO_2$ با افزایش نرخ فتوسنتز و کارایی تثبیت کربن، باعث افزایش ماده خشک اندام هوایی و ریشه می‌شوند (Rezaizad *et al*., 2019) با این حال، در غلظت ۰/۰۵ درصد، کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه مشاهده شد که احتمال دارد به سمیت ناشی از تجمع این نانوذرات در بافت‌های گیاهی مربوط باشد (Raliya *et al*., 2015b).

بررسی تعداد روزنه‌ها در سطح رویی و پشتی برگ در مرحله رویشی نشان داد که بین تیمارهای مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در سطح رویی، تیمارهای ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند اما نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان دادند، درحالی‌که گیاهان شاهد کمترین تعداد روزنه (٣٤ عدد) را داشتند. در سطح پشتی، بیشترین تعداد روزنه در تیمار ۰/۰۳ درصد (۸۲ عدد) و کمترین تعداد در گیاهان شاهد (٧٦ عدد) مشاهده شد. در مرحله زایشی، در سطح رویی تیمار ۰/۰۳ درصد با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت، اما تیمار ۰/۰۵ درصد کاهش معنی‌داری در تعداد روزنه‌ها نسبت به شاهد نشان داد (۳۸ در مقابل ۵۳ عدد). در سطح پشتی، بیشترین تعداد روزنه‌ها مربوط به تیمار ۰/۰۳ درصد (۹۷ عدد) و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۰/۰۵ درصد (۸۱ عدد) بود (شکل۲-A,B و شکل۳). در مورد تعداد سلول‌های ذخیره‌کننده آب، در مرحله رویشی بین تیمارها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]



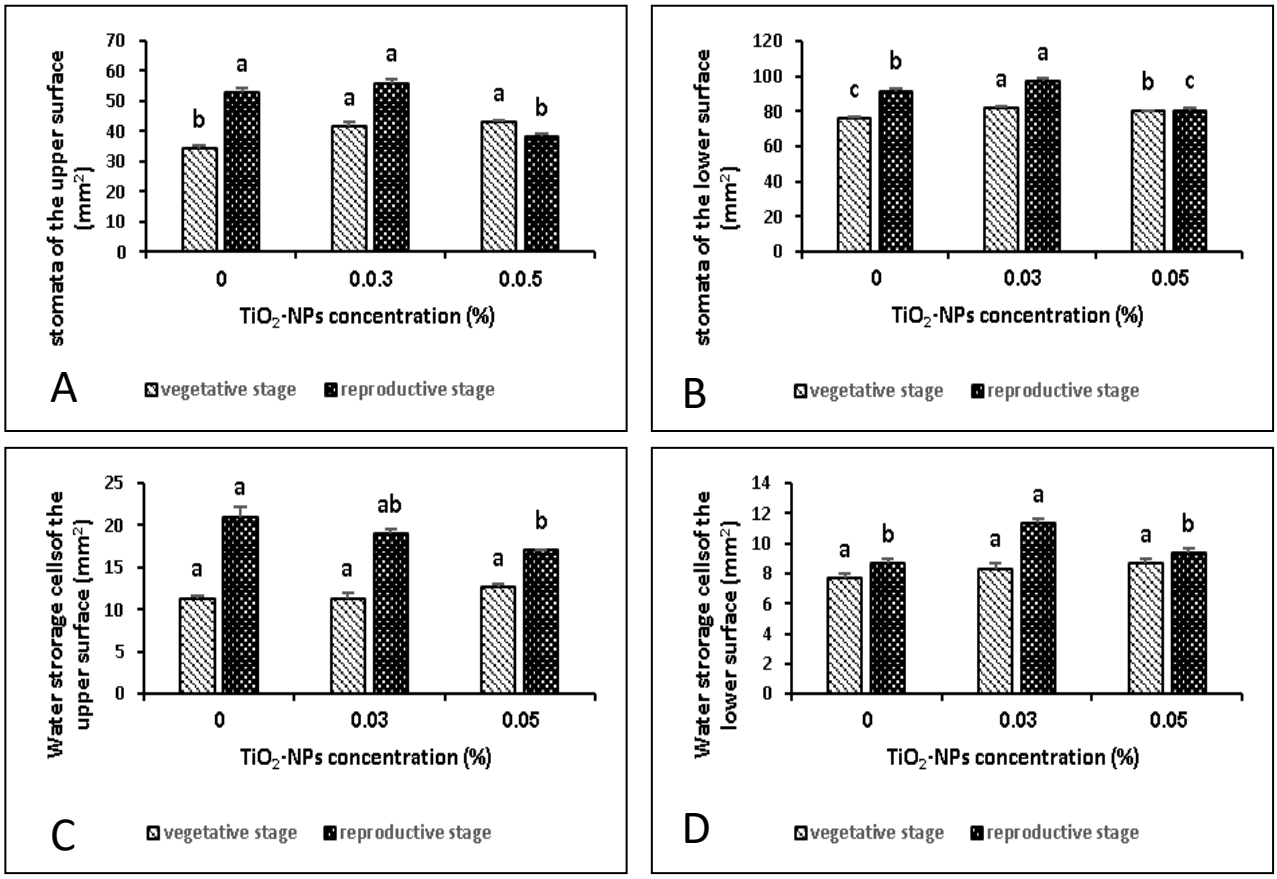

**شکل۱**- اثر سطوح مختلف تیمار نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بر پارامترهای رشدی A: طول اندام هوایی، B: طول ریشه، C: سطح برگ، D: وزن تر اندام هوایی، E: وزن خشک اندام هوایی، F: وزن تر ریشه، G: وزن خشک ریشه در مرحله رویشی و مرحله زایشی در گیاه گل ناز یخی. حروف غیرمشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

**Fig1.** Effect of different levels of titanium dioxide nanoparticles treatment on growth parameters A: shoot length, B: root length, C: leaf area, D: shoot fresh weight, E: shoot dry weight, F: root fresh weight, G: root dry weight in the vegetative and reproductive stages of the *Aptenia cordifolia*. Non-similar letters indicate a significant difference at the 0.05 probability level

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

اما در مرحله زایشی، در سطح رویی بیشترین تعداد سلول‌های ذخیره‌کننده آب در گیاهان شاهد (۲۱ عدد) و کمترین مقدار در تیمار ۰/۰۵ درصد (۱۷ عدد) ثبت شد. تیمار ۰/۰۳ درصد اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نداشت. در سطح پشتی، بیشترین تعداد سلول‌های ذخیره‌کننده آب در تیمار ۰/۰۳ درصد (۱۱ عدد) مشاهده شد، در حالی که بین تیمار ۰/۰۵ درصد و شاهد تفاوت معنی‌داری ثبت نشد (شکل۲-C,D و شکل۳). نانوذرات تأثیر مثبتی بر افزایش تعداد روزنه‌ها در سطح رویی و پشتی برگ‌های گل ناز یخی نشان داد. این یافته با نتایج پژوهشی که نشان دادند نانوذرات سلنیوم موجب بهبود تشکیل و توسعه روزنه‌های ژربرا می‌شود، مطابقت دارد (Khai *et al*., 2022). تجمع نانوذرات روی سطح فتوسنتزی می‌تواند باعث افزایش دمای برگ و تغییر در تبادل گاز به دلیل انسداد روزنه‌ها شود (Aslani *et al*., 2014)همچنین، حضور نانوذرات ممکن است منجر به بزرگ‌تر شدن یا القای منافذ جدید شود که این امر به افزایش انتقال نانوذرات در برگ کمک می‌کند (Nair *et al*., 2012). گزارش شده است که در گیاه سویا، نانوذرات به کندی حرکت کرده و در اندام‌های تیمار شده تأثیر بیشتری دارند (Nair and Chung, 2014). بنابراین احتمال دارد حضور نانوذرات روی برگ باعث القای منافذ جدید شده باشد (El-Shetehy *et al*., 2021). در رابطه با پلاسمولیز سلول‌های ذخیره‌کننده آب در تیمارهای نانوذرات، برخی مطالعات نشان داده‌اند که افزایش غلظت فلزات سنگین تعادل آب درون‌سلولی را مختل کرده و موجب پلاسمولیز می‌شود (Prasad, 1995). بنابراین ممکن است این پلاسمولیز مربوط به تجمع $TiO_2$ باشد.

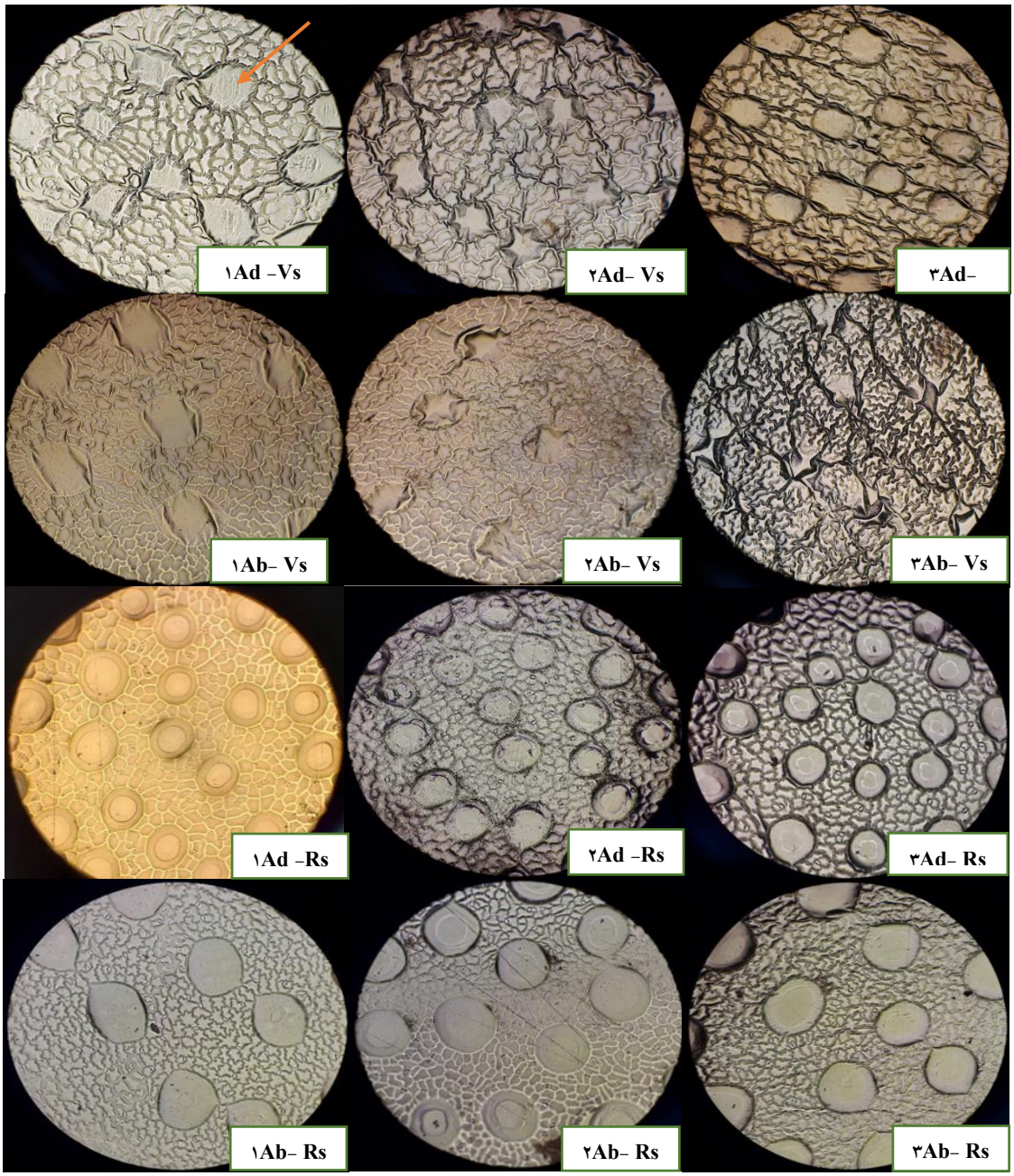



**شکل۲**- اثر سطوح مختلف تیمار نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بر A: تعداد روزنه‌ها در سطح رویی، B: تعداد روزنه‌ها در سطح پشتی برگ، C: تعداد سلول‌های ذخیره-کننده آب در سطح رویی، D: تعداد سلول‌های ذخیره‌کننده آب در سطح پشتی برگ در گیاه گل ناز یخی در مرحله رویشی و مرحله زایشی. حروف غیرمشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

**Fig2.** Effect of different levels of titanium dioxide nanoparticles treatment on A: Number of stomata on the upper surface, B: Number of stomata on the dorsal surface of the leaf, C: Number of water-storing cells on the upper surface, D: Number of water-storing cells on the dorsal surface of the leaf in the *Aptenia cordifolia* in the vegetative and reproductive stages. Different letters indicate a significant difference at the 0.05 probability level.



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]




**شکل۳**- مقایسه تغییرات روزنه و سلول‌های ذخیره‌کننده آب سطح رویی و زیرین برگ گیاه گل ناز یخی در اثر محلول‌پاشی نانوذرات $TiO_2$ ۱-اپیدرم برگ گیاه شاهد، ۲-اپیدرم برگ گیاه تیمار ۰/۰۳ درصد نانوذرات، ۳- اپیدرم برگ گیاه تیمار ۰/۰۵ درصد نانوذرات. Ad مخفف Adaxial (سطح رویی) و Ab مخفف Abaxial (سطح زیرین). Vs مخفف vegetative stage (مرحله رویشی) ، Rs مخفف reproductive stage (مرحله زایشی) را نشان می‌دهد. فلش آبی نشان‌دهنده روزنه و فلش نارنجی نشان‌دهنده سلول ذخیره‌کننده آب

**Fig3.** Comparison of changes in stomata and water-storing cells on the upper and lower surfaces of the leaves of the *Aptenia cordifolia* as a result of foliar spraying with $TiO_2$ nanoparticles: 1- Epidermis of the leaf of the control plant, 2- Epidermis of the leaf of the treated plant with 0.03% nanoparticles, 3- Epidermis of the leaf of the treated plant with 0.05% nanoparticles. Ad stands for Adaxial (upper surface) and Ab stands for Abaxial (lower surface). Vs stands for vegetative stage, Rs stands for reproductive stage. The blue arrow indicates the stomata and the orange arrow indicates the water storage cell.

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

**تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای کلروفیل و کارتنوئید گیاه گل ناز یخی**

نتایج این مطالعه نشان داد که بین تیمارهای مورد بررسی اختلاف معنی‌دار (P<۰/۰۱) است و میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئید در مرحله رویشی در تیمار ۰/۰۳ درصد و در مرحله زایشی در تیمار ۰/۰۵ درصد افزایش یافت. بیشترین میزان کلروفیل a در مرحله رویشی در تیمار ۰/۰۳ درصد (۱۰/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و در مرحله زایشی در تیمار ۰/۰۵ درصد (۳/٦٤ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد، درحالی‌که کمترین میزان آن در گیاهان شاهد (به ترتیب ۷/۲۵ و ۲/٥٦ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) ثبت شد. کلروفیل b در مرحله رویشی و زایشی بیشترین مقدار را در تیمار ۰/۰۳ درصد (به ترتیب ۲/۵۵ و ۰/٦٨ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نشان داد و کمترین مقدار در مرحله زایشی مربوط به گیاهان شاهد با مقدار ۰/٦۳ میلی‌گرم بر گرم وزن ترثبت شد. در حالی که اختلاف معنی‌داری بین تیمار ۰/۰۵ درصد و گیاهان شاهد در مرحله رویشی ثبت نشد. کلروفیل کل رفتاری همانند کلروفیل a را نشان داد به طوری که بیشترین مقدار در مرحله رویشی در تیمار ۰/۰۳ درصد (۱۲/٦۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و در مرحله زایشی در تیمار ۰/۰۵ درصد (٤/٦٤ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کمترین مقدار مربوط به گیاهان شاهد (با مقادیر به ترتیب ۹/۲۸ و ۳/۱۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد، همچنین در مرحله رویشی، تیمار ۰/۰۳ درصد به طور معنی‌داری میزان کارتنوئید را افزایش داد (۲/۵۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، درحالی‌که تیمار ۰/۰۵ درصد اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشت. در مرحله زایشی، بیشترین میزان کارتنوئید در تیمار ۰/۰۵ درصد (۱/۷۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد، درحالی‌که تیمار ۰/۰۳ درصد تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان نداد. این افزایش بیانگر اثر مثبت $TiO_2$ بر بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین که افزایش محتوای کلروفیل و کارتنوئید را در گیاهان تحت تیمار $TiO_2$ گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. از جمله نعنا فلفلی(Ahmad *et al.,* 2018) و گشنیز (Sardar *et al*., 2022). در مطالعه‌ای که قبلا در محیط هیدروپونیک بر روی گل ناز یخی انجام دادیم نیز افزایش رنگیزه‌های کلروفیل a و b در گیاهان تحت تیمار $TiO_2$ نشان داده شده است (Mohajjel Shoja *et al*., 2021) با این حال، برخی پژوهش‌ها بر روی گندم (Dağhan, 2020)، ذرت (Dağhan *et al*., 2018)، نخود (Hajra and Mondal, 2017) و *Spirodela polyrhiza* (Movafeghi *et al*., 2018) کاهش محتوای کلروفیل را در گیاهان تیمارشده با $TiO_2$ گزارش کرده‌اند.$TiO_2$ به دلیل توانایی جذب نور، می‌تواند نقش مهمی در بهبود فتوسنتز ایفا کند (Ghasemlou *et al*., 2019) همچنین، با کاهش تخریب کلروپلاست‌ها، مدت‌زمان فتوسنتز را افزایش می‌دهند (Hong *et al*., 2005). میزان کلروفیل در گیاهان در ابتدای گلدهی به حداکثر می‌رسد و نقش مهمی در فرایند اندام‌زایی دارد (Bojovic and Stojanovic, 2005). بهبود شرایط رشد در این مرحله و افزایش طول دوره گلدهی می‌تواند موجب تولید تعداد بیشتری گل و افزایش عملکرد گیاه شود. علاوه بر این، $TiO_2$ با بهبود جذب آب و عناصر غذایی، به ویژه نیتروژن، باعث افزایش سرعت فتوسنتز و تولید بذرهای بیشتر می‌شود (Xuming *et al*., 2008). کارتنوئیدها نیز به عنوان نقش کلیدی در محافظت از مرکز واکنش فتوسنتزی در برابر اکسیداسیون خودکار، به ویژه در شرایط استرس غیرزیستی شناخته شده‌اند (Gururani *et al*., 2015). به طور کلی، تأثیر افزایشی $TiO_2$ بر محتوای کلروفیل احتمال دارد با افزایش جذب نیتروژن، تقویت فعالیت آنزیمی و محافظت از دستگاه فتوسنتزی مرتبط باشد (Ze *et al*., 2011)

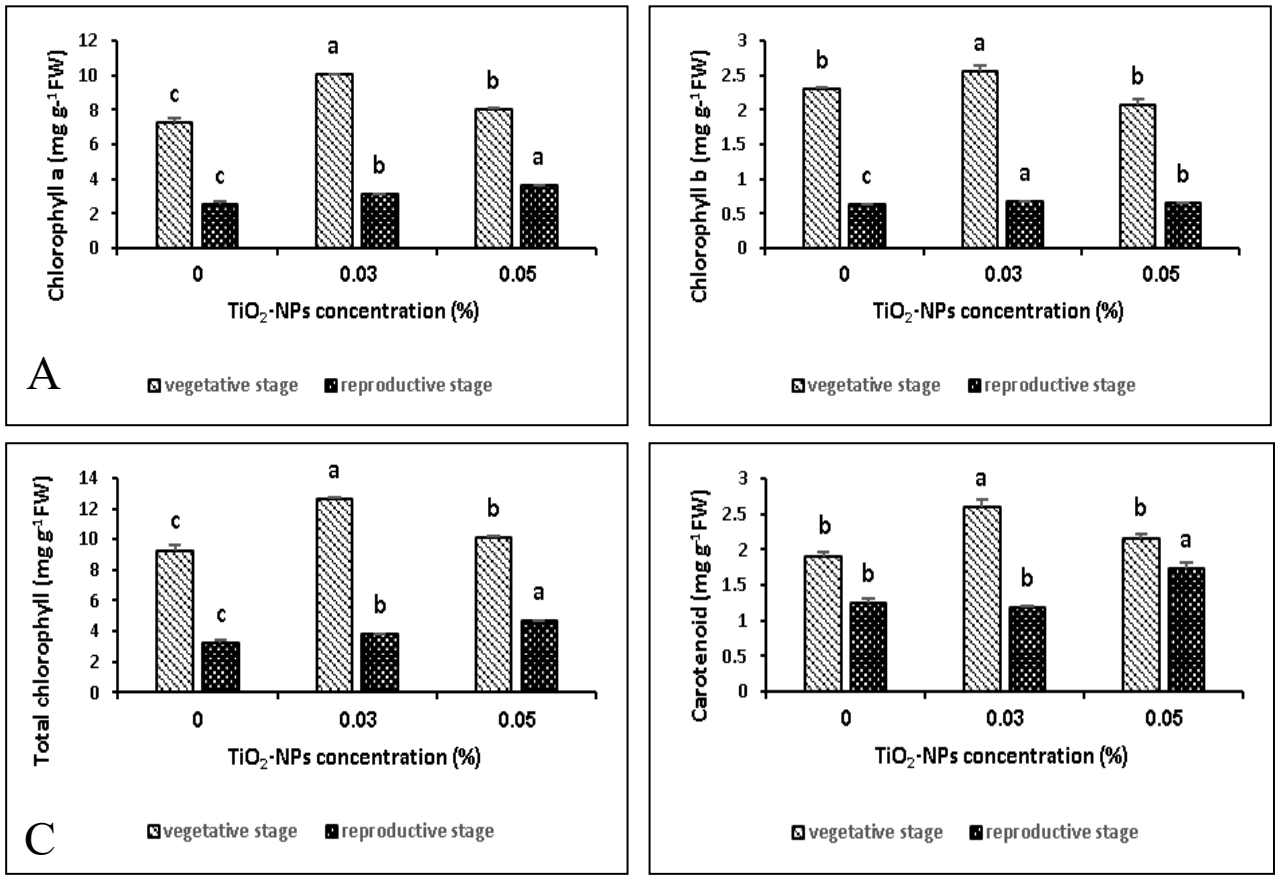
**تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم برآنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه گل ناز یخی**

بررسی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به $TiO_2$ در گیاه مورد مطالعه نشان داد که تفاوت‌های معنی‌داری (P<۰/۰۱) در مراحل رویشی و زایشی وجود دارد. فعالیت آسکوربات پراکسیداز (APX) در مرحله رویشی تغییر معنی‌داری نداشت، اما در مرحله زایشی، بیشترین فعالیت APX مربوط به گیاهان شاهد (۰/۲۵ U $mg^{-1}$ protein) بود. در حالی که تیمارهای نانوذرات ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. در مقابل آنزیم پراکسیداز (POD) در گیاهان تیمارشده نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت. در مرحله رویشی بیشترین فعالیت POD در تیمار ۰/۰۵ درصد (۰/۰۹۳ U $mg^{-1}$ protein) و کمترین آن درگیاهان شاهد (۰/۰۳۵ U $mg^{-1}$ protein) مشاهده شد، و در مرحله زایشی تیمار ۰/۰۳ درصد با ۰/۰۹۰ U $mg^{-1}$ protein بیشترین مقدار را نشان داد. در راستای نتایج ما مطالعه بر روی گیاه ماشک برگ



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

پهن نشان داد فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی دارای الگوی نامنظمی بود، و به استثنای POD، روند U شکل را نشان داد و POD به طور قابل توجهی بالاتر از کنترل بود (Castiglione *et al*., 2014).




**شکل٤**- اثر سطوح مختلف تیمار نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بر رنگیزه‌ها A: کلروفیل a، B: کلروفیل b، C: کلروفیل کل و D: کارتنوئید در مرحله رویشی و مرحله زایشی، در گیاه گل ناز یخی. حروف غیرمشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

**Fig4.** Effect of different levels of titanium dioxide nanoparticles treatment on pigments A: chlorophyll a, B: chlorophyll b, C: total chlorophyll and D: carotenoids in the vegetative and reproductive stages of the *Aptenia cordifolia*. Different letters indicate a significant difference at the 0.05 probability level

بررسی اثر $TiO_2$ بر فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه فلفل نشان داد که $TiO_2$ باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT)، نیترات ردوکتاز و POD شده است (Martínez-Sánchez *et al*., 1993). همچنین بیشترین فعالیت آنزیم CAT، POD، APX به ترتیب در تیمارهای ۰/۰۳، ۰/۰٤ و ۰/۰۵ درصد $TiO_2$ در گیاه عدس و در مرحله ٦۰ درصد ساقه‌دهی و کمترین اثر در مرحله ۵۰ درصد گلدهی گزارش شد (Soltanieh *et al*., 2013). در گیاه مریم‌گلی نیز روند افزایشی این آنزیم‌ها تحت تاثیر افزایش غلظت $TiO_2$ ثبت شده است (Mazarie *et al*., 2019). همچنین افزایش فعالیت پراکسیداز به دلیل کاربرد نانوذرات مس در سویا گزارش شده است (Nair and Chung, 2014). این تفاوت‌ها به نوع گیاه، مرحله رشد، شدت و مدت تنش بستگی دارد (Salama, 2012) هنگامی که فعالیت CAT رو به کاهش است، فعالیت آنزیم‌های دیگر حذف کننده ROSاز طریق یک مسیر جبرانی رو به افزایش است (Malecka *et al*., 2012). افزایش $H_2O_2$ در شرایط تنش موجب برجسته شدن نقش POD در حذف آن می‌شود (Sharma *et al*., 2012). POD آنزیم اصلی (ستون فقرات) در سیستم حفاظت آنتی‌اکسیدانی است (Farahi *et al*., 2023). این موضوع در مطالعه (Samart *et al*., 2018) نیز مورد تأیید قرار گرفته که در آن، افزایش POD و کاهش CAT در گیاه برنج موجب بهبود تحمل به سمیت ROS ناشی از $TiO_2$ شد. می‌توان پیش‌بینی کرد کاربرد $TiO_2$ در گیاه و ورود آن به بافت برگ، باعث ایجاد سمیت در گیاهان می‌شود، در عین حال میزان اکسیدان‌ها در گیاهان افزایش می‌یابد. در نهایت، گیاه مقدار و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها را برای مقابله با اثر نامطلوب



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

ROS افزایش می‌دهد (Ebrahimi *et al*., 2016). همچنین تیتانیوم بر فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه اثر دارد و باعث افزایش فعالیت POD می‌شود. دلیل افزایش فعالیت این آنزیم تحت تاثیر $TiO_2$ احتمال دارد ناشی از افزایش جذب آهن باشد (Martinez-Sanchez *et al*., 1993). همچنین اثر مضر ROS و محصولات پراکسیداسیون لیپیدی توسط یک سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی خنثی می‌شود (Pejic *et al*., 2008).

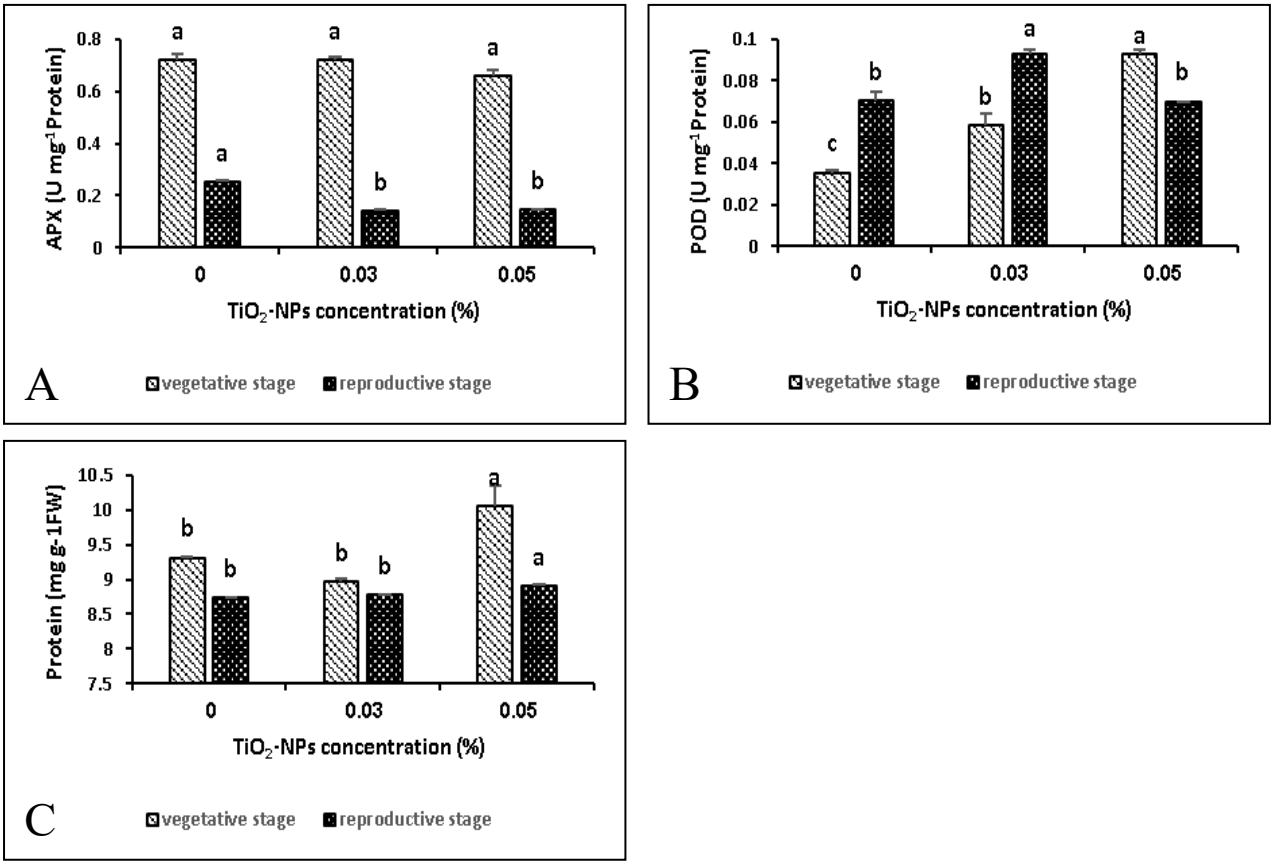
**تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای پروتئین گیاه گل ناز یخی**

بر اساس تحلیل آماری، در مراحل رویشی و زایشی تفاوت معنی‌داری ($P<0/01$) بین تیمارهای مختلف از نظر محتوای پروتئین کل مشاهده شد. تیمار ۰/۰۵ درصد $TiO_2$ در هر دو مرحله رویشی و زایشی اختلاف معنی‌داری با شاهد داشت و بالاترین میزان پروتئین را به ترتیب با مقادیر ۱۰/۰۵ و ۸/۹۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر نشان داد. در مقابل، تیمار ۰/۰۳ درصد تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت. در راستای نتایج ما مطالعه بر روی نخود بیان کرد که سطح پروتئین بالاتر در دوز بالاتر (۱۰۰۰ ppm) $TiO_2$ ثبت شد. اما دوز میانی (۵۰۰ ppm) $TiO_2$ سطح پروتئین کمتری در گیاهان را نشان داد(Hajra and) Mondal, 2017). در مطالعه‌ای *in vitro* که بر روی گیاه سویا تحت تاثیر دو نوع نانوذره $TiO_2$ و ZNO انجام شد هر دو تیمار منجر به افزایش پروتئین کل شدند (Leopold *et al*., 2022). اثر محلول دی‌اکسید تیتانیوم و اکسیدتیتانیوم در گیاه ذرت نشان داد بیشترین میزان پروتئین در غلظت (۰/۰۲ درصد) و کمترین آن در غلظت (۰/۰۱ درصد)، نسبت به شاهد مشاهده شد (Moghaddam and Madani, 2018). در معرض قرار دادن گیاهان با فلزات سنگین موجب القای پاسخ‌های زیادی در سطح فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌شود (Tabatabaee *et al*., 2014). در مورد افزایش میزان پروتئین نسبت به شاهد پژوهشگران قبلاً ثابت کرده بودند که $TiO_2$-NPs جذب نیتروژن، متابولیسم و فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز را افزایش می‌دهند. بنابراین میزان آمونیوم در گیاه نیز افزایش می‌یابد. از یک سو، $TiO_2$ میزان جذب آمونیوم و آنزیم‌های درگیر را افزایش می‌دهد. این آنزیم‌ها باعث می‌شوند که آمونیوم به سرعت به نیتروژن آلی مانند پروتئین، اسیدهای آمینه و کلروفیل تبدیل شود(Yang *et al*., 2006). همچنین از سوی دیگر می‌تواند به علت افزایش میزان آنزیم‌های تعدیل‌کننده شرایط تنش شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و آنزیم‌هایی که در بیوسنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نقش دارند باشد (Yousefi *et al*., 2015).

**نتیجه‌گیری کلی:** بیشتر مطالعات پیشین روی گیاهان زراعی رایج مانند ذرت، گندم و برنج متمرکز بوده و بررسی‌های محدودی در مورد گونه‌های با متابولیسم CAM و همچنین در دو مرحله رویشی و زایشی انجام شده است. بنابراین تا به حال تاثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ($TiO_2$)بر روی گیاه *Aptenia cordifolia* مشخص نشده و پژوهش حاضر نوآوری دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که $TiO_2$ بسته به غلظت مصرفی و مرحله تکوینی گیاه *Aptenia cordifolia*، می‌توانند به طور معنی‌داری ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه را تحت تأثیر قرار دهند. غلظت پایین‌تر (۰/۰۳ درصد) در برخی شاخص‌های بیوشیمیایی از جمله محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، تراکم روزنه‌ها و فعالیت آنزیم پراکسیداز، تأثیرات مثبتی داشت، در حالی که غلظت بالاتر (۰/۰۵ درصد) اغلب با کاهش رشد و بروز علائم سمیت همراه بود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که کاربرد $TiO_2$ باید به صورت کنترل شده و با در نظر گرفتن مرحله رشد، ویژگی‌های گونه گیاهی و شرایط زیستی انجام پذیرد. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی در شرایط مزرعه‌ای و بر پایه دوره‌های طولانی‌تر، با هدف ارزیابی پایداری، ایمنی زیستی و بهره‌وری کاربرد نانوذرات در مقیاس واقعی صورت گیرد. همچنین، بررسی سازوکارهای مولکولی دخیل در پاسخ گیاهان به این نانوذرات و تحلیل اثرهای ترکیبی آن‌ها با سایر نهاده‌های کشاورزی، می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های علمی برای بهره‌برداری ایمن و مؤثر از فناوری نانو در کشاورزی پایدار نقش‌آفرین باشد.

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]




**شکل۵**- اثر سطوح مختلف تیمار نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بر A: آسکوربات پراکسیداز، B: پراکسیداز، C: پروتئین در مرحله رویشی و مرحله زایشی در گیاه گل ناز یخی. حروف غیرمشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

**Fig5.** Effect of different levels of titanium dioxide nanoparticles treatment on A: ascorbate peroxidase, B: peroxidase, C: protein in the vegetative and reproductive stages of the *Aptenia cordifolia*. Different letters indicate a significant difference at the 0.05 probability level.

## References

## منابع

Abdel Latef, A. A. H., Srivastava, A. K., El-sadek, M. S. A., Kordrostami, M., & Tran, L. S. P. (2018). Titanium dioxide nanoparticles improve growth and enhance tolerance of broad bean plants under saline soil conditions. *Land Degradation & Development*, *29*(4), 1065-1073. https://doi.org/10.1002/ldr.2780

Ahmad, B., Shabbir, A., Jaleel, H., Khan, M. M. A., & Sadiq, Y. (2018). Efficacy of titanium dioxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and quality in *Mentha piperita* L. *Current Plant Biology*, *13*, 6-15. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2018.04.002

Amirjani, M. R., Askary Mehrabadi, M., & Azizmohamadi, F. (2016). Effect of ZnO nanoparticles on vegetative factors, elements content and photosynthetic pigments of wheat (Triticum aestivum). *Journal of Plant Biological Sciences*, *8*(27), 33-48. doi: 10.22108/ijpb.2016.20692 [In Persian]

Aslani, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Juraimi, A. S., Hashemi, F. S. G., & Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview. *The Scientific World Journal*, https://doi.org/10.1155/2014/641759

Asli, S., & Neumann, P. M., (2009). Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, cell & environment*, 32(5), 577-584. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01952.x

Bojovic, B. M., & Stojanovic, J. (2005). Chlorophyll and carotenoid content in wheat cultivars as a function of mineral nutrition. *Archives of Biological Sciences*, 57(4), 283-290. https://doi.org/10.2298/ABS0504283B

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical*

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

*biochemistry*, *72*(1-2), 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Dağhan, H. A. T. İ. C. E. (2018). Effects of $TiO_2$ nanoparticles on maize (*Zea mays* L.) growth, chlorophyll content and nutrient uptake. *Applied Ecology and Environmental Research*, *16*. doi: 10.15666/aeer/1605_68736883

Dağhan, H., Gülmezoğlu, N., Köleli, N., & Karakaya, B. (2020). Impact of titanium dioxide nanoparticles ($TiO_2$-NPs) on growth and mineral nutrient uptake of wheat (*Triticum vulgare* L.). *Biotech Studies*, *29*(2), 69-76. https://doi.org/10.38042/biost.2020.29.02.03

Daryabeigi Zand, A., & Vaezi Heir, A. (2022). The Effect of Different Levels of Titanium Dioxide Nanoparticles in Soil on Sorghum Growth Characteristics. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, *13*(3), 47-61. doi: 10.47176/jspi.13.3.20601 [in Persian]

De Azevedo Neto, A.D., Prisco, J.T., Eneas-Filho, J., de Abreu, C.E.B., & Gomes-Filho, E. (2006). Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 56(1), 87-94. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.008

Dere, Ş., Gunes, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll-A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany*, 22(1), 13-18. https://journals.tubitak.gov.tr/botany/vol22/iss1/3

Dias, M. C., Santos, C., Pinto, G., Silva, A. M., & Silva, S. (2019). Titanium dioxide nanoparticles impaired both photochemical and non-photochemical phases of photosynthesis in wheat. *Protoplasma*, *256*, 69-78. https://doi.org/10.1007/s00709-018-1281-6

Ebrahimi, A., Galavi, M., Ramroudi, M., & Moaveni, P. (2016). Effect of $TiO_2$ nanoparticles on antioxidant enzymes activity and biochemical biomarkers in pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Molecular Biology Ressearch*, *6*(1), 58. doi:10.5539/jmbr. v6n1p58, 1925-4318 1925-430X

El-Shetehy, M., Moradi, A., Maceroni, M., Reinhardt, D., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B., ... & Schwab, F. (2021). Silica nanoparticles enhance disease resistance in Arabidopsis plants. *Nature Nanotechnology*, *16*(3), 344-353. doi: 10.1038/s41565-020-00812-0.

Farahi, S. M. M., Yazdi, M. E. T., Einafshar, E., Akhondi, M., Ebadi, M., Azimipour, S., ... & Iranbakhsh, A. (2023). The effects of titanium dioxide ($TiO_2$) nanoparticles on physiological, biochemical, and antioxidant properties of Vitex plant (Vitex agnus-Castus L). *Heliyon*, *9*(11). doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e22144

Feizi, H., Rezvani Moghadam, P., Fotovat, A., & Shah Tahmasbi, N. (2011). Reaction of wheat seed to different concentrations of titanium dioxide nanoparticles in comparison with non-nano-particles. In *Proc*. Of 2th congress on science and technology seed. Nov (pp. 4-5).

Fusconi, A., Gallo, C., & Camusso, W. (2007). Effects of cadmium on root apical meristems of Pisum sativum L.: cell viability, cell proliferation and microtubule pattern as suitable markers for assessment of stress pollution. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 632(1-2), 9-19. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.03.012

Ghasemlou, F., Amiri, H., Karamian, R., & Mirzaie-asl, A. (2019). Alleviation of the effects of on drought stress Verbascum nudicuale by methyl jasmonate and titanium dioxide nanoparticles. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *9*(4), 2911-2920. https://doi.org/10.22034/IJPP.2019.668857

Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M. R., Fotopoulos, V., & Kimura, S. (2020). Titanium dioxide nanoparticles ($TiO_2$ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of Dracocephalum moldavica. *Scientific reports*, *10*(1), 912. https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1

Gholami, A., Abbaspour, H., Gerami, M., & HASHEMI, M. H. (2020). The effect of titanium dioxide nanoparticles ($TiO_2$) on photosynthetic pigments and some biochemical and antioxidant properties of Rosmarinus officinalis L. *Iranian Journal of Food Science and Technology, 17*(105), 123-134. SID. https://sid.ir/paper/373938/en [in Persian]

Gururani, M. A., Venkatesh, J., & Tran, L. S. P. (2015). Regulation of photosynthesis during abiotic stress-induced photoinhibition. *Molecular plant*, *8*(9), 1304-1320. http://dx.doi.org/10.1016/j.molp.2015.05.005

Hajra, A., & Mondal, N. K. (2017). Effects of ZnO and $TiO_2$ nanoparticles on germination, biochemical and morphoanatomical attributes of *Cicer arietinum* L. *Energy, Ecology and Environment*, *2*(4), 277-288. https://doi.org/10.1007/s40974-017-0059-6

Hong, F., Zhou, J., Liu, C., Yang, F., Wu, C., Zheng, L., & Yang, P. (2005). Effect of nano-$TiO_2$ on photochemical reaction of chloroplasts of spinach. *Biological trace element research*, *105*(1), 269-279. https://doi.org/10.1385/BTER:105:1-3:269

Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, *8*(5), 1196-1210. doi: 10.1039/D3NR05012B

Hou, J., Wang, L., Wang, C., Zhang, S., Liu, H., Li, S., & Wang, X. (2019). Toxicity and mechanisms of action of titanium dioxide nanoparticles in living



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

organisms. *Journal of environmental sciences*, *75*, 40-53. https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.06.010

Irshad, M. A., ur Rehman, M. Z., Anwar-ul-Haq, M., Rizwan, M., Nawaz, R., Shakoor, M. B., ... & Ali, S. (2021). Effect of green and chemically synthesized titanium dioxide nanoparticles on cadmium accumulation in wheat grains and potential dietary health risk: A field investigation. *Journal of Hazardous Materials*, *415*, 125585. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125585

Khai, H. D., Mai, N. T. N., Tung, H. T., Luan, V. Q., Cuong, D. M., Ngan, H. T. M., ... & Nhut, D. T. (2022). Selenium nanoparticles as in vitro rooting agent, regulates stomata closure and antioxidant activity of gerbera to tolerate acclimatization stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, *150*(1), 113-128. https://doi.org/10.1007/s11240-022-02250-3

Ko, J. A., & Hwang, Y. S. (2019). Effects of nano$TiO_2$ on tomato plants under different irradiances. *Environmental pollution*, *255*, 113141. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113141

Kushwah, K. S., & Patel, S. (2020). Effect of titanium dioxide nanoparticles ($TiO_2$ NPs) on Faba bean (Vicia faba L.) and induced asynaptic mutation: a meiotic study. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*, 1107-1118. https://doi.org/10.1007/s00344-019-10046-7

Lahuf, A. A., Jaafar, O. H., Al-mosoy, M., Hameed, Z. L., & Li, J. (2018). First record of the crown rot fungus Fusarium equiseti affecting *Triticum aestivum* L. and *Aptenia cordifolia* in Iraq. AJAB. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, *6*(4), 543-548. https://doi.org/10.35495/

Leopold, L. F., Coman, C., Clapa, D., Oprea, I., Toma, A., Iancu, Ș. D., ... & Coman, V. (2022). The effect of 100–200 nm ZnO and $TiO_2$ nanoparticles on the in vitro-grown soybean plants. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *216*, 112536. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112536

Lian, J., Zhao, L., Wu, J., Xiong, H., Bao, Y., Zeb, A., ... & Liu, W. (2020). Foliar spray of $TiO_2$ nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (Zea mays L.). *Chemosphere*, *239*, 124794. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124794

MacAdam, J. W., Nelson, C. J., & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, *99*(3), 872-878. https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872

Malecka, A., Piechalak, A., Mensinger, A., Hanć, A., Baralkiewicz, D., & Tomaszewska, B. (2012). Antioxidative defense system in Pisum sativum roots exposed to heavy metals (Pb, Cu, Cd, Zn). *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(6), 1721-1730.

Martínez-Sánchez, F., Nunez, M., Amoros, A., Gimenez, J. L., & Alcaraz, C. F. (1993). Effect of titanium leaf spray treatments on ascorbic acid levels of *Capsicum annuum L. fruits. Journal of plant Nutrition*, 16(5), 975-981. https://doi.org/10.1080/01904169309364586

Mattiello, A., Filippi, A., Pošćić, F., Musetti, R., Salvatici, M. C., Giordano, C., ... & Marchiol, L. (2015). Evidence of phytotoxicity and genotoxicity in *Hordeum vulgare* L. exposed to $CeO_2$ and $TiO_2$ nanoparticles. *Frontiers in Plant Science*, 1043. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01043

Mazarie, A., Mousavi-nik, S. M., Ghanbari, A., & Fahmideh, L. (2019). Effect of different spraying concentrations of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on some physiological traits and antioxidant system activity of Sage (Salvia officinalis L). *Journal of Plant Biological Sciences*, *11*(1), 1-22. doi: 10.22108/ijpb.2018.110510.1092 [In Persian]

Moghaddam, H. T., & Madani, A. (2016). Influence of titanium foliar application on antioxidant enzyme activity and some biochemical attributes of corn. *Maydica electronic publication*, 61 ~ M23.

Mohajjel Shoja, H., Ahmadi, L., Kolahi, M., & Mohajel Kazemi, E. (2021). Effect of $TiO_2$ NPs on the growth, anatomic features and biochemistry parameters of Baby sun rose (Aptenia cordifolia). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *27*, 2071-2081. https://doi.org/10.1007/s12298-021-01050-x

Movafeghi, A., Khataee, A., Abedi, M., Tarrahi, R., Dadpour, M., & Vafaei, F. (2018). Effects of $TiO_2$ nanoparticles on the aquatic plant Spirodela polyrrhiza: Evaluation of growth parameters, pigment contents and antioxidant enzyme activities. *Journal of Environmental Sciences*, *64*, 130-138. https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.020

Mustafa, H., Ilyas, N., Akhtar, N., Raja, N. I., Zainab, T., Shah, T., ... & Ahmad, P. (2021). Biosynthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles and its effects along with calcium phosphate on physicochemical attributes of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *223*, 112519. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112519

Nair, P. M. G., & Chung, I. M. (2014). A mechanistic study on the toxic effect of copper oxide nanoparticles in soybean (Glycine max L.) root development and lignification of root cells. *Biological trace element research*, *162*, 342-352. https://doi.org/10.1007/s12011-014-0106-5

Nair, R., Mohamed, M. S., Gao, W., Maekawa, T., Yoshida, Y., Ajayan, P. M., & Kumar, D. S. (2012). Effect of carbon nanomaterials on the germination and growth of rice plants. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, *12*(3), 2212-2220. https://doi.org/10.1166/jnn.2012.5775



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). An introduction to nanotechnology. In *Interface Science and Technology* (Vol. 28, pp. 1-27). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8

Nejatie Zadeh, S., Malekzadeh Shafaroudi, S., Astaraei, A. R., & Moshtaghi, N. (2018). Effects of Titanium Dioxide ($TiO_2$) and EDTA on Growth and Biochemical Properties of Spinach (Spinacia oleracea). *Journal Of Horticultural Science*, *32*(3), 419-427. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v32i3.67146 [In Persian]

Pejic, S., Todorović, A., Stojiljković, V., Kasapović, J., & Pajović, S. B. (2009). Antioxidant enzymes and lipid peroxidation in endometrium of patients with polyps, myoma, hyperplasia and adenocarcinoma. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 7(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/1477-7827-7-149

Prasad, M. N. V. (1995). Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. *Environmental and Experimental Botany*, *35*(4), 525-545. https://doi.org/10.1016/0098-8472(95)00024-0

Raliya, R., Biswas, P., & Tarafdar, J. C. (2015a). $TiO_2$ nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). *Biotechnology Reports*, *5*, 22-26. https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.009

Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015b). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, *7*(12), 1584-1594. https://doi.org/10.1039/c5mt00168d

Rezaizad, M., Hashemi-Moghaddam, H., Abbaspour, H., Gerami, M., & Mueller, A. (2019). Photocatalytic effect of $TiO_2$ nanoparticles on morphological and photochemical properties of stevia plant (*Stevia rebaudiana Bertoni*). *Sugar Tech*, *21*(6), 1024-1030. https://doi.org/10.1007/s12355-019-00726-9

Ruffini Castiglione, M., Giorgetti, L., Cremonini, R., Bottega, S., & Spanò, C. (2014). Impact of $TiO_2$ nanoparticles on *Vicia narbonensis* L.: potential toxicity effects. *Protoplasma*, *251*(6), 1471-1479. https://doi.org/10.1007/s00709-014-0649-5

Ruffini Castiglione, M., Giorgetti, L., Geri, C., & Cremonini, R. (2011). The effects of nano-$TiO_2$ on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *Journal of Nanoparticle Research*, *13*(6), 2443-2449. https://doi.org/10.1007/s11051-010-0135-8

Said, A. A. E., Attia, E. Z., Abdelmohsen, U. R., & A Fouad, M. A. (2019). Natural products potential of the genus Aptenia. *Journal of Advanced Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, *2*(2), 59-62. doi: 10.21608/jabps.2019.6908.1032

Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant science*, *163*(5), 1037-1046. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9

Salama, H. M. (2012). Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris L.*) and corn (*Zea mays L.*). *International Research Journal of Biotechnology*, 3(10), 190-197. http://www.interesjournals.org/IRJOB

Samadi, N., Yahyaabadi, S., & Rezayatmand, Z. (2014). Effect of $TiO_2$ and $TiO_2$ nanoparticle on germination, root and shoot length and photosynthetic pigments of *Mentha piperita*. *International Journal of Plant & Soil Sci*ence, *3*(4), 408-418. doi: 10.9734/IJPSS/2014/7641

Samart, S., Phakamas, N., & Chutipaijit, S. (2018). Assessment of antioxidant enzymes in response to exogenous titanium dioxide ($TiO_2$) nanoparticles in Chainat 1 rice cultivar. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14160-14165. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.083

Santos Filho, R. D., Vicari, T., Santos, S. A., Felisbino, K., Mattoso, N., Sant'Anna-Santos, B. F., ... & Leme, D. M. (2019). Genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles and triggering of defense mechanisms in Allium cepa. *Genetics and molecular biology*, *42*(2), 425-435. https://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-47572019000300425

Sardar, R., Ahmed, S., & Yasin, N. A. (2022). Titanium dioxide nanoparticles mitigate cadmium toxicity in *Coriandrum sativum* L. through modulating antioxidant system, stress markers and reducing cadmium uptake. *Environmental Pollution*, *292*, 118373. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118373

Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., Saradhi, P. P., Khanna, P. K., & Arora, S. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*, 167(8), 2225-2233. https://doi.org/10.1007/s12010-012-9759-8

Silva, S., de Oliveira, J. M. P. F., Dias, M. C., Silva, A. M., & Santos, C. (2019). Antioxidant mechanisms to counteract $TiO_2$-nanoparticles toxicity in wheat leaves and roots are organ dependent. *Journal of hazardous materials*, *380*, 120889. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120889

Soltanieh, M., Mavaouni, P., & Nouri, H. (2013). The effect of foliar application of titanium dioxide nanoparticles on yield, yield components, and antioxidant enzyme activities in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Plant Environmental Physiology*, 77–88. [In Persian]

Song, G., Gao, Y., Wu, H., Hou, W., Zhang, C., & Ma, H. (2012). Physiological effect of anatase $TiO_2$ nanoparticles on *Lemna minor*. *Environmental*



[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]
[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]

*Toxicology and Chemistry*, 31(9), 2147-2152. https://doi.org/10.1002/etc.1933

Song, U., Shin, M., Lee, G., Roh, J., Kim, Y., & Lee, E. J. (2013). Functional analysis of $TiO_2$ nanoparticle toxicity in three plant species. *Biological trace element research*, *155*, 93-103. https://doi.org/10.1007/s12011-013-9765-x

Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y., & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(2), 245-259. https:// doi. org/ 10.1080/ 03650 340. 2020. 17230 03

Tabatabaee, Z., Razavizadeh, R., Rostami, F. (2014). Changes occurring in canola (*Brassiac napus* L) in response silver nanoparticles treatment under in vitro conditions, *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4 (S3), 797-807. www.cibtech.org/sp.ed/jls/2014/03/jls.htm

Waghmode, M. S., Gunjal, A. B., Mulla, J. A., Patil, N. N., & Nawani, N. N. (2019). Studies on the titanium dioxide nanoparticles: Biosynthesis, applications and remediation. *Discover Applied Sciences*, *1*(4), 310. doi: https://doi.org/10.1007/s42452-019-0337-3

Xuming, W., Fengqing, G., Linglan, M., Jie, L., Sitao, Y., Ping, Y., & Fashui, H. (2008). Effects of nano-anatase on ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase mRNA expression in spinach. *Biological trace element research*, 126(1), 280-289. https://doi.org/10.1007/s12011-008-8203-y

Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C., & Yang, P. (2006). Influence of nano-anatase $TiO_2$ on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological trace element research*, *110*(2), 179-190. https://doi.org/10.1385/BTER:110:2:179

Yousefi, K., Riahi, A., & Baghizadeh, A. (2015). Investigation of the effects of Ag and Cu elicitors on flavone synthase 1 gene expression and some biochemical parameters on Cuminum cyminum L. endemic from Iran. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *28*(1), 210-223. doi: 28120 [In Persian]

Ze, Y., Liu, C., Wang, L., Hong, M., & Hong, F. (2011). The regulation of $TiO_2$ nanoparticles on the expression of light-harvesting complex II and photosynthesis of chloroplasts of *Arabidopsis thaliana. Biological trace element research*, 143(2), 1131-1141. https://doi.org/10.1007/s12011-010-8901-0

Zhang, W., Long, J., Geng, J., Li, J., & Wei, Z. (2020). Impact of titanium dioxide nanoparticles on Cd phytotoxicity and bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *International journal of environmental research and public health*, *17*(9), 2979. https://doi.org/10.3390/ijerph17092979

[ Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29 ]

[ DOI: 10.61882/gebsj.14.1.2 ]