

تأثیر نانو ذره اکسید روی بر محتوای سولفورافان، خصوصیات بیوشیمیایی و مورفولوژیکی گیاهچه‌های از مک (*Lepidium draba*)

مهشید قاضی‌زاده احساسی^۱، علی ریاحی مدوار^{۲*}، الهام رضوان‌نژاد^۳ و فرشته جدید بنیاد^۱
^۱ گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ^۲ گروه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ^۳ گروه بیوتکنولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۲/۰۲)

چکیده

از مک گیاهی دولپه از خانواده براسیکاسه و حاوی مقدار قابل توجهی گلوکوزینولات گلوکورافانین است که پس از هیدرولیز آنزیمی، سولفورافان تولید می‌کند. در این پژوهش، محتوای سولفورافان، خصوصیات بیوشیمیایی و مورفولوژیکی گیاهچه‌های از مک که به مدت هفت روز در حضور غلظت‌های مختلف (صفر (به‌عنوان شاهد)، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) نانو ذره اکسید روی رشد کرده بودند، مورد آنالیز قرار گرفتند. براساس نتایج، میزان جوانه‌زنی بذرها در حضور غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته بود، به‌طوری‌که در حضور بالاترین غلظت نانو ذره، میزان جوانه‌زنی حدود ۳۰ درصد کاهش نشان داد. طول ساقه و ریشه هماهنگ با افزایش غلظت نانو ذره در محیط به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش نشان داد. به‌طوری‌که در بالاترین غلظت این ذره، طول ساقه و ریشه به‌ترتیب حدود ۶۰ و ۷۰ درصد کاهش نشان دادند. علاوه بر این، محتوای کلروفیل، کاروتنوئید و فلاونوئید گیاهچه‌های تیمار شده با تمام غلظت‌های نانو ذره به‌صورت معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافتند. در مقابل، نتایج نشان‌دهنده افزایش محتوای سولفورافان در گیاهچه‌های تیمار شده در حضور غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در مقایسه با نمونه شاهد است. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد، به‌طوری‌که در بالاترین غلظت، فعالیت آن بیش از سه برابر نمونه شاهد افزایش یافته بود. تأثیر مثبت این ذره همچنین بر میزان پروتئین‌های محلول (در تمامی غلظت‌ها) و محتوای آنتوسیانین (تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به نمونه شاهد مشاهده گردید. علاوه بر این، میزان جذب یون روی در ریشه و ساقه گیاهچه‌های تیمار شده، هماهنگ با افزایش غلظت این ذره در محیط افزایش نشان داد. به‌طور کلی، با توجه به افزایش محتوای سولفورافان، آنتوسیانین و افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز چنین به‌نظر می‌رسد که جذب این ذرات به سطح و یا تجمع آنها در گیاهچه‌ها منجر به تنش اکسیداتیو و در نتیجه کاهش رشد گیاه شده است. لذا پیشنهاد می‌شود، جهت بررسی مکانیسم دقیق تأثیر نانو ذره اکسید روی بر این گیاه، سایر پارامترهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و ژنتیکی نیز باید مورد آنالیز قرار گیرند.

کلمات کلیدی: از مک، نانو ذره اکسید روی، سولفورافان، آنتوسیانین، کاتالاز

مقدمه

نشان داد است که بیشترین محتوای سولفورافان در گیاهچه‌های سه تا هفت روزه از مک یافت می‌شود (Mohammadi *et al.*, 2014) و محتوای سولفورافان این گیاه تحت تیمار با یون روی (Mohammadi *et al.*, 2014)، یون آهن و مس (Aminizadeh *et al.*, 2014) نانو اکسید آهن (Fe_3O_4) و نانو اکسید مس (CuO) (Aminizadeh *et al.*, 2016)، گلوکز (Rezaee *et al.*, 2018) و همچنین تنش شوری (Jamshidi Goharrizi *et al.*, 2019) افزایش یافته است.

نانوذرات حاصل تجمع اتم‌ها یا مولکول‌هایی با ابعاد عملکردی کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند (Ball, 2002). از مهم‌ترین ویژگی‌های شناخته‌شده نانو ذرات می‌توان به قابلیت تحرک توسط آب، جذب توسط گیاهان و انباشتگی در بافت‌های گیاهی و خاک (Corredor *et al.*, 2009; Ferry *et al.*, 2009) اشاره کرد. اغلب مطالعات کنونی بیانگر افزایش اثر سمیت نانو ذرات همزمان با کاهش اندازه و افزایش غلظت آنها است (Yang and Watts, 2005; Lee *et al.*, 2008). با بررسی درصد جوانه‌زنی و مهار رشد ریشه در گیاهان متعدد در حضور نانو ذرات مختلف از قبیل روی (Zn)، اکسید روی (ZnO)، مس (Cu) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) اثرات منفی این ذرات به اثبات رسیده است (Yang and Watts, 2005; Lee *et al.*, 2007; Lin and Xing, 2008). به‌عنوان مثال تیمار گیاه *Lolium perenne* با نانو ذرات اکسید روی باعث کاهش قابل توجه بیومس و رشد ریشه گردید (Lin and Xing, 2008). در مطالعه دیگری، اثرات منفی نانو ذرات پالادیوم (Pd) بر گیاه *Hordeum vulgare* اثبات شد (Battke *et al.*, 2008). همچنین بررسی اثر نانو ذرات مس بر گیاهچه‌های *Phaseolus radiatus* و *Triticum aestivum* بیانگر اثر مهاری این ذرات بر رشد آنها بود (Lee *et al.*, 2008).

مکانیسم اصلی عملکرد نانو ذرات هنوز شناخته نشده است، اما مطالعات مختلف در شرایط درون و خارج از شیشه نشان داده که آنها گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تولید می‌کنند که بر کلسیم درون سلولی، فعال نمودن فاکتورهای رونویسی و ایجاد تغییر در سیتوکینین‌ها نقش دارند. ROSها با آسیب

از مک (*Lepidium draba* L.) گیاهی دولپه‌ای، با سیستم ریشه عمیق و متعلق به خانواده براسیکاسه است که توسط بذر و قطعات ریشه تکثیر می‌شود. این گیاه ویژه مناطق گرم و نواحی آفتاب‌گیر است و خاک‌هایی با بافت سنگین و حاصلخیز را ترجیح می‌دهد و می‌توان آن را به مقدار قابل توجهی در حاشیه زمین‌های بایر و جاده‌ها مشاهده کرد (King and Hill, 1966; Scurfield, 1962). این گیاه بومی جنوب غرب آسیا از جمله ایران و همچنین جنوب شرق اروپا است که به سایر نقاط جهان نیز گسترش پیدا کرده است (Jacobs, 2007).

اعضا این خانواده منابع استثنایی و غنی از متابولیت‌های ثانویه بنام گلوکوزینولات هستند که ساختار آنها از گلوکز و یک اسید آمینه مشتق می‌شود (Mithen, 2001). حضور این متابولیت‌ها در گیاهان سبب مقاومت آنها در برابر تنش‌های مختلف می‌شود (Hopkins *et al.*, 2009; Hirayama and Shinozaki, 2010). گلوکوزینولات‌ها در واکنش ذخیره می‌شوند و آسیب سلول باعث می‌شود تا این متابولیت‌ها در معرض آنزیم میروزیناز (EC 3.2.3.1) قرار بگیرند. این آنزیم پیوند β -تیوگلوکوزیدی مولکول‌های گلوکوزینولات را شکسته و گلوکز و یک ترکیب حدواسط ناپایدار به نام آگلیکون تولید می‌کند. آگلیکون برحسب شرایط محیط و به صورت خودبخودی به ترکیبات مختلفی از قبیل تیوسیانات، نیتریل و ایزوتیوسیانات تبدیل می‌شود (Rask *et al.*, 2000).

از مک به دلیل حضور دو گلوکوزینولات به‌طور عمده (گلوکورافانین و گلوکوسینالبین) به‌عنوان یک گیاه مطلوب برای استخراج گلوکورافانین که یک گلوکوزینولات آلیفاتیک و پیش‌ساز سولفورافان (۱- ایزوتیوسیانات - ۴- متیل سولفینیل بوتانت) است، مورد توجه قرار گرفته است (Fahey *et al.*, 2001). سولفورافان ویژگی‌های درمانی مختلفی از قبیل؛ آنتی‌اکسیدانی (Gao *et al.*, 2001; Yeh and Yen, 2009)، خواص پیشگیری و درمانی بر روی سرطان‌ها (Radonic *et al.*, 2012; Liang and Yuan, 2012) و خواص ضدباکتری (Fahey *et al.*, 2002) از خود نشان می‌دهد. مطالعات اخیر

در این تحقیق، اثر غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی بر محتوای سولفورافان، فلاونوئید، آنتوسیانین و رنگیزه‌های گیاهی (کلروفیل، کاروتنوئید) و همچنین فعالیت آنزیم کاتالاز، میزان پروتئین‌های محلول و خصوصیات مورفولوژیک گیاهچه‌های ازمک که به مدت هفت روز در معرض این ذره رشد کرد بودند مورد آنالیز قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

کشت بذرها و تیمار آنها: بذرهای مورد استفاده در این تحقیق از گیاهان رشد یافته در اطراف شهر کرمان (۳۰ کیلومتری شرق کرمان، با آب و هوای گرم و خشک) در اواخر بهار و اوایل تابستان ۱۳۹۲ جمع‌آوری گردیدند. بذرها پس از ضد عفونی شدند (۱۵ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۲/۵ درصد، سه مرتبه شستشو با آب مقطر استریل، یک دقیقه غوطه‌وری در الکل ۷۰ درصد و پنج مرتبه شستشو با آب مقطر استریل) در محیط کشت MS (Murashige and Skoog, 1962) حاوی آگار ۰/۸ درصد (pH=۷) و غلظت‌های صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره اکسید روی در پتری‌دیش (قطر ۹ سانتی‌متر) کشت شدند. لازم به ذکر است که محیط کشت طبق پروتکل طراحی شده توسط Lee و همکاران (Lee et al., 2008) تهیه شد تا نانوذرات پراکنش یکسانی را در محیط کشت داشته باشند. به این منظور سوسپانسیون‌هایی از غلظت‌های مختلف نانوذرات در آب مقطر استریل (pH \pm ۰/۲) تهیه شد و به محیط کشت اضافه شد. نانوذرات با درصد خلوص ۹۹/۹٪ و میانگین قطر ۶۱ نانومتر، از شرکت MP هلند تهیه شد. سپس پتری‌دیش‌ها در انکوباتور با دمای ۲۸ \pm ۲ درجه سانتی‌گراد در تاریکی مطلق و با رطوبت نسبی ۵۵ \pm ۵ درصد قرار داده شدند. پس از گذشت دو روز، پتری‌دیش‌ها به ژرمیناتور با دمای ۲۵ \pm ۲ درجه سانتی‌گراد و با رطوبت نسبی ۶۵-۶۰ درصد با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی (۱۰۰۰۰ Lux) و ۸ ساعت تاریکی منتقل شدند. پس از گذشت پنج روز، گیاهچه جمع‌آوری شده و بعد از شستشو با آب مقطر استریل و آبگیری، در داخل ازت مایع سریعاً منجمد شدند و به فریزر

رساندن به DNA، تداخل با مسیر سیگنالینگ سلولی، تغییرات در روند رونویسی ژن‌ها می‌توانند به سلول‌ها آسیب وارد کنند (Buzea et al., 2007; Nel et al., 2006).

گیاهان در مقابله با ROSها، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی با سازوکارهای آنزیمی و غیر آنزیمی را فعال می‌کنند که می‌توانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن را از بین ببرند (Inze and Montagu, 1995). در سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی، فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، گلوکاتایون S ترانسفراز و غیره موجب خنثی‌سازی رادیکال‌های اکسیژن در سلول‌ها می‌گردد (Choi et al., 2004). سیستم دفاعی غیر آنزیمی در گیاهان شامل توکروفرول‌ها، آسکوربیک اسید، کاروتنوئیدها و ترکیبات فنلی از قبیل آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها است (Foyer and Noctor, 2011).

در حالت طبیعی بین مقدار تولید رادیکال‌های آزاد و میزان جاروب کردن آنها از سطح سلولی تعادلی وجود دارد که گیاه را در حالت نسبتاً پایدار نگه می‌دارد. اما تنش اکسیداتیو زمانی بروز می‌کند که میزان رادیکال‌ها در سلول از مقدار ترکیب‌های آنتی‌اکسیدان تجاوز کند (Pandey et al., 2002).

روی، یک عنصر کم‌مصرف ضروری برای رشد و نمو گیاهان است و در فعالیت برخی آنزیم‌ها، بیوستز کلروفیل و متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و چربی‌ها و همچنین استحکام غشا نقش دارد (Madhava and Srestry, 2000). مقادیر خیلی کم یا زیاد این عنصر، باعث اختلال در فرآیندهای متابولیسمی و در نتیجه کاهش یا توقف رشد گیاهان می‌شود (Broadle et al., 2007). مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مقدار زیادی روی با افزایش تولید ROSها باعث استرس اکسیداتیو می‌شود (Marschner, 1995).

ZnO بعد از سیلیکا (SiO₂) و تیتانیا (TiO₂) یکی از پر استفاده‌ترین نانوذرات است (Lin and Xing, 2007) و در صنایع مختلف می‌تواند جانشین ماکرومولکول ZnO شود که به‌طور گسترده در صنایع لاستیک‌سازی، سلول‌های خورشیدی و محصولات آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ji and Ye, 2008).

۸۰- درجه سانتی‌گراد تا زمان استفاده منتقل شدند.

اندازه‌گیری محتوای سولفورافان: جهت اندازه‌گیری میزان

تولید سولفورافان از روش Liang و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شد. به‌منظور تهیه عصاره، ۰/۳ گرم از بافت تازه گیاهچه درون هاون سائیده شد و ۱ میلی‌لیتر آب اسیدی (pH=5) به آن اضافه گردید. این محلول به درون فالكون ۱۵ میلی‌لیتری منتقل و به‌مدت دو ساعت در حمام آب‌گرم با دمای 2 ± 42 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از این مدت، ۵ میلی‌لیتر استونیتریل به آن اضافه و توسط دستگاه سونیکاتور (با استفاده از امواج فراصوت) به‌مدت ۳ دقیقه سونیکیت گردید تا بافت به اندازه کافی متلاشی و عصاره آن خارج شود. عصاره به‌دست آمده به‌مدت ۱۰ دقیقه با دور ۱۰۰۰۰ rpm در دمای اتاق سانتریفیوژ گردید. محلول رویی پس از عبور از فیلتر سر سرنگی ۰/۲ میکرومتر به فالكون دیگری منتقل گردید. سنجش محتوای سولفورافان با استفاده از دستگاه HPLC (1100 Series شرکت Agilent) در دمای اتاق انجام شد. در ابتدا محلول استاندارد سولفورافان به ستون C18 ($25 \times 0/46$ سانتی‌متر) دستگاه HPLC تزریق شد تا پیک استاندارد و زمان نگهداری نمونه در ستون مشخص گردد. به این منظور از یک حلال دو فازی شامل استونیتریل و آب به‌ترتیب به نسبت ۰/۴ و ۰/۶ استفاده شد. پیک حاصله به‌عنوان مرجع برای مقایسه با پیک‌های به‌دست آمده مورد استفاده قرار گرفت. برای شناسایی این ترکیب از طول‌موج ۲۵۴ نانومتر استفاده شد (Liang et al., 2006).

اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیک، درصد جوانه‌زنی

بذور: به‌منظور بررسی اثر نانوذره اکسید روی بر درصد جوانه‌زنی بذرها، از روز دوم به بعد تعداد بذره‌های جوانه‌زده شمارش شد. میزان جوانه‌زنی بر حسب درصد جوانه‌زنی در روز چهارم نسبت به نمونه شاهد محاسبه گردید. سپس درصد جوانه‌زنی از رابطه زیر محاسبه گردید (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳).

/ (تعداد بذره‌های جوانه‌زده) = درصد جوانه‌زنی در هر پتری

۱۰۰ × (تعداد بذر کل

اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه: از گیاهچه‌های هفت روزه

رشدکرده در حضور غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی برای اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه استفاده شد. از هر تکرار تعداد هفت گیاهچه از محیط‌کشت جمع‌آوری شدند و بعد از شستشو با آب مقطر استریل، طول ریشه از یقه تا انتهای ریشه اصلی و طول ساقه از یقه تا جوانه انتهایی، با خط‌کش اندازه‌گیری و برحسب سانتی‌متر گزارش گردید (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳).

سنجش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید: برای سنجش

محتوای کلروفیل و کاروتنوئید از روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) استفاده شد. بدین منظور، ۰/۱ گرم بافت تازه در ۵ میلی‌لیتر استن ۸۵٪ سائیده و پس از سانتریفیوژ با دور rpm ۱۰۰۰۰ به‌مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، جذب محلول رویی در طول‌موج‌های $663/2$ ، $663/2$ و 470 توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Carry-50 اندازه‌گیری شد و درنهایت غلظت رنگیزه‌ها از رابطه‌های زیر محاسبه گردید (Lichtenthaler, 1987).

Chlorophyll a = $(12/25 \times OD_{663.2nm} - 2/79 \times OD_{646.8nm})$

Chlorophyll b = $(21/21 \times OD_{646.8nm} - 5/1 \times OD_{663.2nm})$

Total Chlorophyll = Chlorophyll a + Chlorophyll b

Carotenoids = $((1000 \times OD_{470nm} - 1/8 \times \text{Chlorophyll a} - 85/02 \times \text{Chlorophyll b})/198)$

سنجش محتوای فلاونوئید: اندازه‌گیری محتوای فلاونوئید

براساس روش Krizek و همکاران (۱۹۹۸) انجام شد. به‌طور خلاصه، ۰/۲ گرم بافت تازه در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول اسیدی که شامل اتیل الکل: اسید کلریدریک با نسبت ۹۹:۱ به‌طور کامل سائیده شد و پس از سانتریفیوژ با دور rpm ۸۰۰۰ به‌مدت ۱۰ دقیقه، محلول رویی به‌آرامی در حمام آب‌گرم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده شد. میزان جذب محلول به‌دست آمده با دستگاه اسپکتروفتومتر در سه طول‌موج ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. از ضریب خاموشی $M^{-1}cm^{-1}$ ۳۳۰۰۰ برای محاسبه محتوای فلاونوئید استفاده شد و محتوای فلاونوئید نمونه‌ها برحسب $mg\ g^{-1}$ به‌صورت تجمعی گزارش گردید (Krizek et al., 1998).

سنجش محتوای آنتوسیانین: جهت اندازه‌گیری محتوای

برحسب مقدار پروتئین کل (میلی گرم) موجود در ۱۰۰ میکرولیتر عصاره در یک دقیقه محاسبه گردید. یک واحد آنزیمی کاتالاز، مقدار آنزیمی است که ۱ میلی مول آب اکسیژنه را در یک دقیقه تجزیه می کند (Dhindsa *et al.*, 1981).

تعیین میزان جذب روی: به منظور اندازه گیری غلظت یون روی در ریشه و ساقه گیاهچه‌ها، مقدار ۰/۵ گرم بافت گیاهی خشک (به منظور خشک کردن نمونه‌ها، پس از جمع آوری گیاه و شستشو با آب مقطر استریل، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند) را در ۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ به مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا نمونه گیاهی به خوبی در اسید حل شود. در ادامه محلول به دست آمده را حرارت داده تا بخارات اسیدی آن خارج شوند. جهت اندازه گیری میزان روی جذب شده توسط گیاه، با دستگاه جذب اتمی (inductivity coupled plasma ICP mass spectrometry (SpectrAA 220 Varian) مورد استفاده قرار گرفت. جهت تعیین غلظت عنصر روی، ابتدا غلظت‌های محلول استاندارد را به دستگاه تزریق نموده و نمودار استاندارد مربوطه رسم شد (McGrath and Cunliffe, 1985).

این پژوهش با سه تکرار مستقل و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. میانگین داده‌ها با نرم افزار SAS 9.2 با استفاده از آنالیز واریانس و آزمون چند دامنه‌ای دانکن با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۰/۵ مورد تجزیه قرار گرفتند. برای رسم نمودارها، مقایسه میانگین‌ها از نرم افزار Excel 2010 استفاده گردید.

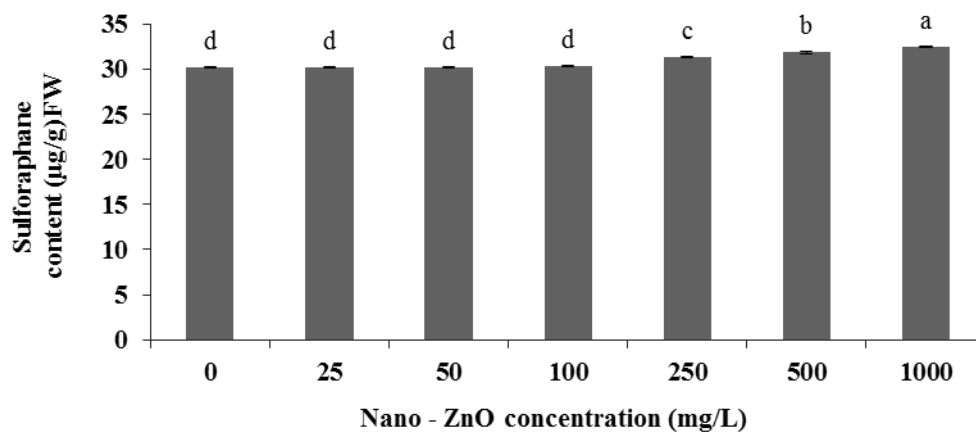
نتایج

محتوای سولفورافان: از استاندارد سولفورافان جهت تعیین زمان نگهداری نمونه در ستون و غلظت سولفورافان در گیاهچه‌های تیمار شده استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که محتوای سولفورافان گیاهچه‌های تیمار شده با نانوذره اکسید روی در غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر نسبت به نمونه شاهد به صورت معنی داری (در سطح پنج درصد) افزایش یافته است (شکل ۱).

آنتوسیانین گیاهچه‌ها، از روش Krizek و همکاران (۱۹۹۳) استفاده شد. مقدار ۰/۱ گرم بافت گیاهی در ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی که شامل متانول: اسید کلریدریک با نسبت ۱:۹۹ به طور کامل ساییده شد. عصاره حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد با دور ۴۰۰۰ سانتریفیوژ گردید و محلول رویی به عنوان منبع رنگدانه به مدت یک شب در تاریکی قرار گرفت. سپس توسط دستگاه اسپکتوفتومتر جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه گیری شد. جهت محاسبه محتوای آنتوسیانین از ضریب خاموشی $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ۳۳۰۰۰ استفاده شد و محتوای آنتوسیانین نمونه‌ها برحسب mg g^{-1} گزارش گردید (Krizek *et al.*, 1993).

عصاره گیری آنزیمی و سنجش مقدار پروتئین: جهت عصاره گیری پروتئین‌های محلول، مقدار ۰/۵ گرم ساقه گیاه در بافر پتاسیم فسفات (۵۰ میلی مولار) با pH برابر ۵/۷ حاوی یک میلی مولار PMSF، حاوی یک میلی مولار EDTA و ۱/۱ پلی وینیل پیرولیدون (PVP) ساییده شد. مخلوط به دست آمده با دور ۱۰۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شد. از محلول رویی جهت اندازه گیری محتوای پروتئین محلول کل و بررسی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT) مورد استفاده قرار گرفت (Nasiri-Bezenjani *et al.*, 2014). برای اندازه گیری مقدار پروتئین‌های محلول در گیاه از روش برادفورد استفاده شد (Bradford, 1967).

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز: سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT, EC 1.11.1.6) با استفاده از محاسبه کاهش جذب H_2O_2 در طول موج ۲۴۰ نانومتر و با روش Dhindsa و همکاران (۱۹۸۱) انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۲/۸۷ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی مولار با pH برابر ۷ و ۳۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۱۵ میلی مولار بود و با اضافه نمودن ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی واکنش شروع شد. محلول شاهد برای صفر کردن دستگاه اسپکتروفتومتر شامل مخلوط واکنش فاقد عصاره آنزیمی بود. میزان H_2O_2 موجود در مخلوط واکنش پس از یک دقیقه با استفاده از ضریب خاموشی $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ۴۳/۶ و فرمول $A=\epsilon bc$ محاسبه شد. فعالیت آنزیم به صورت واحد آنزیمی



شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی بر محتوای سولفورافان گیاهچه‌های هفت روزه از مک. حرف‌های متفاوت در نمودارها، نشانه معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن است.

جدول ۱- خصوصیات مورفولوژیکی گیاهچه‌های هفت روزه از مک رشد کرده در حضور غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی

جوانه‌زنی بذرها (%)	طول ریشه (cm)	طول ساقه (cm)	غلظت نانوذره اکسید روی (mg/L)
78.33 ± 4.5^a	1.51 ± 0.02^a	0.66 ± 0.02^a	۰
71.16 ± 0.48^{ab}	0.99 ± 0.01^b	0.49 ± 0.01^b	۲۵
69.16 ± 0.48^a	0.93 ± 0.009^b	0.42 ± 0.01^{bc}	۵۰
68.33 ± 1.27^{ab}	0.91 ± 0.007^b	0.39 ± 0.01^{cd}	۱۰۰
59.16 ± 3.46^b	0.76 ± 0.01^c	0.32 ± 0.01^{de}	۲۵۰
55 ± 0.63^b	0.5 ± 0.02^d	0.3 ± 0.008^e	۵۰۰
55 ± 1.66^b	0.45 ± 0.02^d	0.27 ± 0.007^e	۱۰۰۰

در هر ستون، حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن است.

اکسید روی در محیط کاهش معنی‌داری یافته است.

محتوای فلاونوئید: همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، در گیاهچه‌های تیمار شده با تمام غلظت‌های نانوذره اکسید روی، محتوای فلاونوئید در مقایسه با نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است.

محتوای آنتوسیانین: محتوای آنتوسیانین گیاهچه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی تا غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در مقایسه با نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است، این در حالی است که محتوای این متابولیت در حضور غلظت‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر

خصوصیات مورفولوژیکی: همان‌طور که در جدول ۱

مشاهده می‌شود، کاهش میزان جوانه‌زنی بذرها در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و بالاتر از آن نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار است. همچنین طول ریشه و ساقه گیاهچه‌های تیمار شده با نانوذره اکسید روی به‌صورت گرادیان با افزایش غلظت این ذره در محیط نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است.

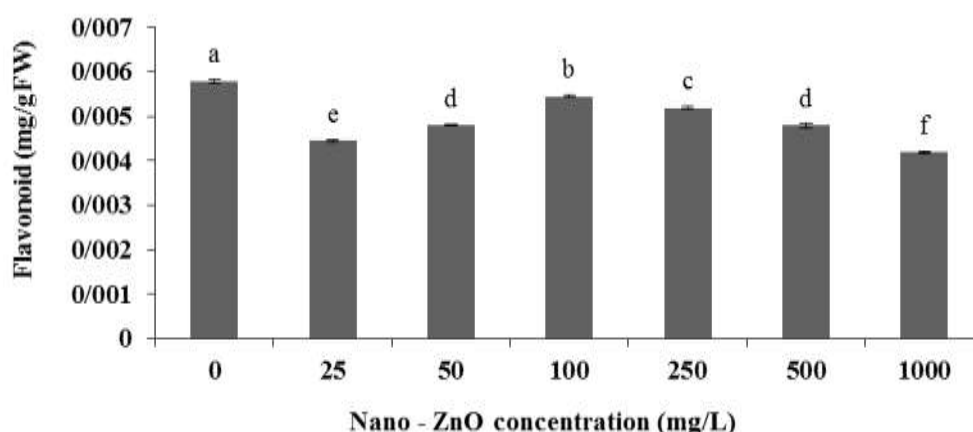
محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی: همان‌طور که در جدول ۲

مشاهده می‌شود، محتوای کلروفیل‌های a، b، کل و کاروتنوئید در گیاهچه‌های هفت روزه *L. draba* با افزایش غلظت نانوذره

جدول ۲- محتوای کلروفیل a, b، کل و کاروتنوئید در گیاهچه‌های ازمک تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی

غلظت نانوذره اکسید روی (mg/L)	کاروتنوئید (mgg ⁻¹ FW)	کلروفیل کل (mgg ⁻¹ FW)	کلروفیل b (mgg ⁻¹ FW)	کلروفیل a (mgg ⁻¹ FW)
۰	۰/۳۳ ± ۰/۰۰۱ ^a	۲/۳۷ ± ۰/۰۰۵ ^a	۰/۸۵ ± ۰/۰۰۲ ^a	۱/۵۲ ± ۰/۰۰۲ ^a
۲۵	۰/۲۹ ± ۰/۰۰۱ ^b	۱/۸۶ ± ۰/۰۰۱ ^b	۰/۶۹ ± ۰/۰۰۲ ^b	۱/۱۷ ± ۰/۰۰۲ ^b
۵۰	۰/۲۷ ± ۰/۰۰۱ ^c	۱/۷۱ ± ۰/۰۰۴ ^c	۰/۶۹ ± ۰/۰۰۵ ^b	۱/۰۱ ± ۰/۰۰۱ ^c
۱۰۰	۰/۲۳ ± ۰/۰۰۰۸ ^d	۱/۳۶ ± ۰/۰۰۱ ^d	۰/۴۸ ± ۰/۰۰۱ ^c	۰/۸۸ ± ۰/۰۰۱ ^d
۲۵۰	۰/۲۰ ± ۰/۰۰۰۹ ^e	۱/۳۲ ± ۰/۰۰۱ ^e	۰/۴۸ ± ۰/۰۰۱ ^c	۰/۸۷ ± ۰/۰۰۰۹ ^e
۵۰۰	۰/۲۰ ± ۰/۰۰۰۸ ^e	۱/۲۲ ± ۰/۰۰۲ ^f	۰/۴۵ ± ۰/۰۰۲ ^d	۰/۷۶ ± ۰/۰۰۱ ^f
۱۰۰۰	۰/۱۵ ± ۰/۰۰۰۲ ^f	۱/۱۱ ± ۰/۰۰۲ ^g	۰/۳۹ ± ۰/۰۰۱ ^e	۰/۷۱ ± ۰/۰۰۱ ^g

در هر ستون حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن است.



شکل ۲- محتوای فلاونوئید گیاهچه‌های ازمک تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی. حرف‌های متفاوت در نمودارها، معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

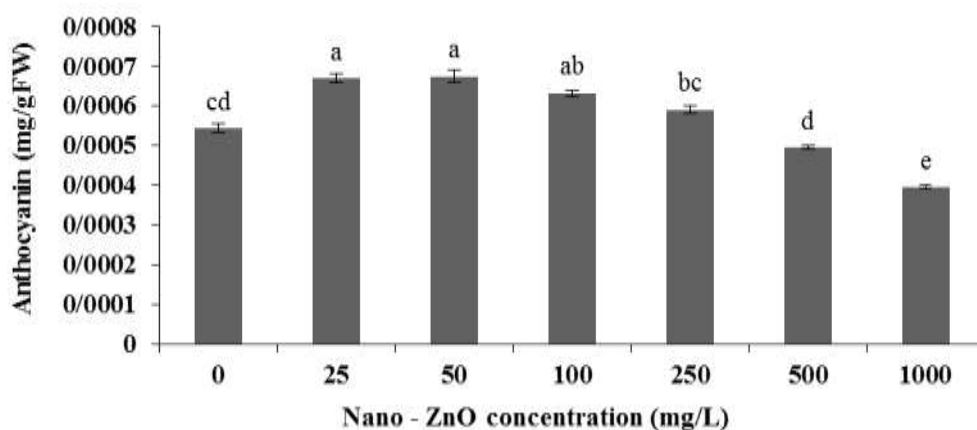
مشاهده می‌شود، غلظت پروتئین‌های محلول در گیاهچه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. افزایش محتوای پروتئین تا غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌طور گرادیان است و بیشترین محتوای پروتئین در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده گردید. در عین حال، با افزایش بیشتر غلظت نانوذره در محیط، محتوای پروتئین محلول کاهش یافت.

جذب یون روی در ریشه و ساقه گیاه: همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوذره اکسید روی

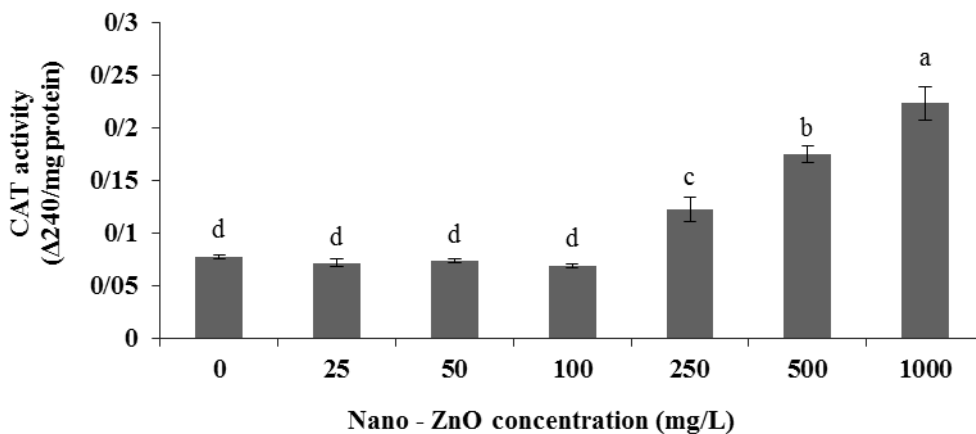
لیتر تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد با نمونه شاهد ندارد. در عین حال، در بالاترین غلظت نانوذره کاهش معنی‌داری محتوای آنتوسیانین مشاهده گردید (شکل ۳).

فعالیت آنزیم کاتالاز: فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های تیمار شده با نانوذره اکسید روی تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشابه نمونه شاهد و در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و بالاتر از آن در مقایسه با نمونه شاهد افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. بیشترین فعالیت آنزیم مربوط به غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است (شکل ۴).

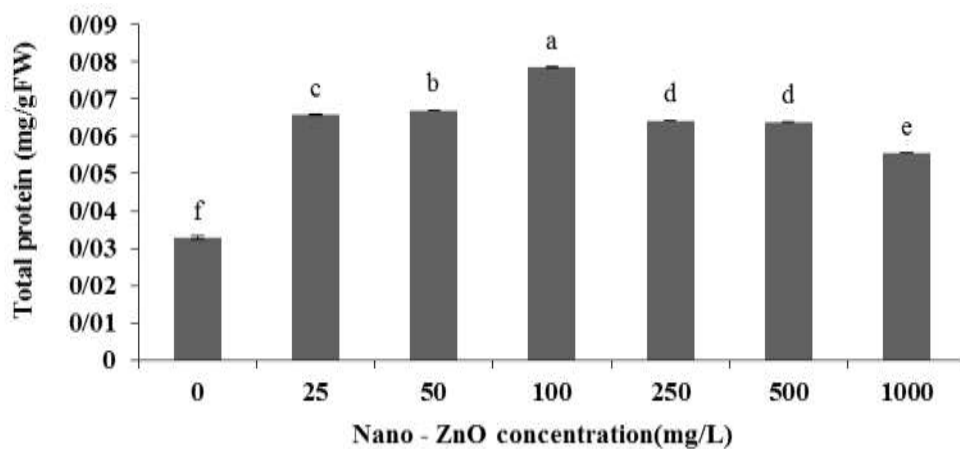
محتوای پروتئین‌های محلول: همان‌طور که در شکل ۵



شکل ۳- محتوای آنتوسیانین گیاهچه‌های از مک تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی. حرف‌های متفاوت در نمودارها، معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن را نشان می‌دهند.



شکل ۴- فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های از مک تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی. حرف‌های متفاوت در نمودارها، معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن را نشان می‌دهند.



شکل ۵- مقایسه غلظت پروتئین‌های محلول در گیاهچه‌های از مک تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید روی. حرف‌های متفاوت در نمودار، معنی‌داری را در سطح پنج درصد با آزمون دانکن نشان می‌دهند.

جدول ۳- میزان جذب روی توسط ساقه و ریشه در گیاهچه‌های ازمک تیمار شده با نانوذره اکسید روی

غلظت نانوذره اکسید روی	میزان جذب توسط ساقه	میزان جذب توسط ریشه
(mg/L)	(mg/g)	(mg/g)
۰	۰/۰۵ ± ۰/۰۰۰۶ ^e	۰/۰۳ ± ۰/۰۰۲ ^d
۲۵	۰/۲۸ ± ۰/۰۰۰۱ ^d	۱/۱۶ ± ۰/۰۲ ^c
۵۰	۰/۳۴ ± ۰/۰۰۰۶ ^c	۱/۱۷ ± ۰/۰۹ ^c
۱۰۰	۰/۴۵ ± ۰/۰۰۱ ^b	۱/۲۴ ± ۰/۰۰۲ ^c
۲۵۰	۰/۹۲ ± ۰/۰۰۲ ^a	۲/۱۲ ± ۰/۰۰۸ ^b
۵۰۰	۰/۹۱ ± ۰/۰۰۱ ^a	۲/۸۲ ± ۰/۰۲ ^a
۱۰۰۰	۰/۹۱ ± ۰/۰۰۵ ^a	۲/۷۲ ± ۰/۰۱ ^a

در هر ستون حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح پنج درصد با آزمون دانکن است.

در محیط، میزان جذب روی در ریشه و ساقه نسبت به نمونه شاهد بور معنی‌داری افزایش یافته است.

بحث

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر نانوذره اکسید روی بر خصوصیات مورفولوژیکی گیاه ازمک، میزان جوانه‌زنی بذر و طول ریشه و ساقه این گیاه در گیاهچه‌هایی که به مدت هفت روز در حضور غلظت‌های مختلف این ذره رشد کرده بودند اندازه‌گیری شد. دو صفت میزان جوانه‌زنی و رشد ریشه به دلیل سادگی اندازه‌گیری و حساسیت بالا از مهم‌ترین صفاتی هستند که در بررسی تأثیر آلودگی‌ها بر روی گیاهان اندازه‌گیری می‌شوند (Munzuroglu and Geckil, 2002). همان‌طور که در جدول ۱ قابل مشاهده است رشد ریشه و همچنین ساقه هماهنگ با افزایش غلظت این ذره در محیط، به صورت معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد. به طوری که در حضور بالاترین غلظت نانوذره، میزان کاهش رشد ریشه و ساقه نسبت به نمونه شاهد به ترتیب حدود ۷۰ و ۶۰ درصد محاسبه گردید. براساس نتایج گزارش شده در جدول ۱، کاهش معنی‌دار میزان جوانه‌زنی بذر این گیاه در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده می‌شود، به طوری که در حضور بالاترین غلظت این ذره میزان کاهش جوانه‌زنی بذر نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۰ درصد است. مطالعات گذشته نیز نشان

داده است که میزان جوانه‌زنی و طول ریشه در گیاه تربچه و چچم که با نانوذرات روی و اکسید روی تیمار شده بودند به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد که با نتایج حاصل از این تحقیق همخوانی دارد (Lin and Xing, 2007). تأثیر منفی نانوذرات مختلف از قبیل Fe_3O_4 و CuO بر میزان جوانه‌زنی، رشد ریشه و همچنین رشد ساقه در گیاهچه‌های ازمک که به مدت هفت روز در حضور غلظت‌های مختلف این ذرات رشد کرده بودند گزارش شده است (Aminizadeh et al., 2016). نکته جالب توجه اینکه، میزان جوانه‌زنی بذر این گیاه در حضور غلظت‌های مختلف یون روی (ZnSO_4) (۲۵-۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) مشابه نمونه شاهد بود (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳) که با نتایج حاصل از این تحقیق مغایرت دارد. علاوه بر این، در تیمار گیاهچه‌های ازمک با این یون، طول ریشه در حضور تمامی غلظت‌های مورد استفاده و طول ساقه در تیمار با غلظت‌های بیشتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به نمونه شاهد کاهش معنی‌دار نشان دادند (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳) که با نتایج حاصل از این تحقیق همخوانی دارد.

از طرف دیگر، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید نیز مشابه خصوصیات مورفولوژیکی در گیاهچه‌های تیمار شده با نانوذره در مقایسه با نمونه شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافتند (جدول ۲). نتایج

و مس است (Chehregani and Malayeri, 2007). علاوه بر این، مطالعات اخیر بر روی این گیاه نشان داد است که این گیاه قابلیت جذب یون روی و نقره را از طریق ریشه و انتقال آن به ساقه را دارد (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳). آنها، دلیل کاهش رشد ریشه و ساقه گیاهچه‌های از مک رشد یافته در حضور یون روی را به دلیل تنش اکسیداتیو ناشی از تولید ROSها نسبت دادند (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳).

ثابت شده است که غلظت بالای روی در گیاه باعث بروز تنش اکسیداتیو به وسیله تولید ROSها و عدم رشد طبیعی گیاهان می‌شود (Weckx and Clijsters, 1997; Rout and Das, 2003). بنابراین چنین به نظر می‌رسد که کاهش رشد ریشه و ساقه در حضور نانوذره اکسید روی به دلیل تنش اکسیداتیو بعد از جذب این یون باشد. گزارش شده است که مهار رشد گیاهان در حضور غلظت‌های بالای روی، ممکن است به دلیل رقابت این فلز با فسفر در گیاه باشد (Rout and Das, 2003). برخی از محققین معتقدند، که تجمع روی در سیتوزول سلول‌های گیاهی از طریق مهار فرآیند تنفس، اختلال در عملکرد طبیعی سلول‌ها و واکنش‌های انرژی‌خواه مرتبط با رشد سلول، سبب کاهش رشد و نمو طبیعی گیاهان شود (Candan and Tarhan, 2003).

به منظور بررسی اثر این ذره بر سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه از مک، از سیستم آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی، محتوای سولفورافان (مشتق شده از گلوکورافانین) و ترکیبات فنلی شامل فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها و از سیستم آنتی‌اکسیدان آنزیمی، فعالیت آنزیم کاتالاز مورد ارزیابی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در غلظت‌های بیش از ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره اکسید روی، محتوای سولفورافان به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. افزایش محتوای سولفورافان، در این گیاه در حضور غلظت‌های مختلف یون $ZnSO_4$ (Zn) توسط Mohammadi و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است (Mohammadi et al., 2014). آنها تأثیر مثبت یون روی بر محتوای سولفورافان را به تولید ROSها و فعال‌شدن مسیر سیگنالینگ بعد از جذب روی توسط

مشابهی در بررسی تأثیر نانوذرات اکسید روی بر محتوای کلروفیل a، b و همچنین کاروتنوئید در گیاهان گندم و گوجه‌فرنگی گزارش شده است (Amooaghaie et al., 2017). کاهش محتوای کلروفیل به‌عنوان یک اثر عمومی سمیت فلزات سنگین در گیاهان شناخته شده است (Rout and Das, 2003). این امر به دلیل اثر مستقیم این فلزات بر فرآیند بیوسنتز کلروفیل، القای تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن و ایجاد تنش اکسیداتیو و در نتیجه تخریب ساختمان‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل صورت می‌گیرد (Rout and Das, 2003). کاهش محتوای کلروفیل کل در گیاه *Phaseolus vulgaris* پس از در معرض قرارگرفتن با فلزات سنگین سرب، مس، کادمیوم و جیوه گزارش شده است (Zengin and Munzuroglu, 2005). Rao و Shekhawat گزارش کردند که محتوای کلروفیل کل در گیاهچه‌های تیمار شده *Brassica juncea* با نانوذره اکسید روی کاهش می‌یابد، آنها این کاهش را به دلیل اختلال در غشا کلروپلاست توسط روی مربوط دانستند (Rao and Shekhawat, 2014).

در هر صورت، مکانیسم اصلی تأثیر منفی نانوذرات اکسید روی بر رشد گیاهان هنوز به‌طور دقیق مشخص نشده است. Lin و Xing (۲۰۰۷) تأثیر منفی این ذرات و نانوذرات روی بر طول ریشه در گیاه تربچه و چچم را به دلیل انحلال روی و اثر وابسته به یون‌های روی نسبت دادند (Lin and Xing, 2007). در مطالعه Rao و Shekhawat (۲۰۱۴) نیز مشاهده گردید که در گیاهچه‌های *Brassica juncea* تیمار شده با اکسید روی، یون روی در ریشه و هم در ساقه هماهنگ با افزایش غلظت این ذره در محیط تجمع یافته است. آنها دلیل سمیت نانوذره اکسید روی در گیاهچه‌های *Brassica juncea* را تولید ROS و تنش اکسیداتیو گزارش کردند (Roa and Shekhawat, 2014). همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در این مطالعه نیز هماهنگ با افزایش غلظت نانوذره اکسید روی در محیط، محتوای یون روی در ریشه و ساقه گیاهچه‌های از مک افزایش یافته است. مطالعات گذشته ثابت است که گیاه از مک یک گیاه تجمع‌کننده فلزات سنگین از قبیل سرب، آهن، منگنز

گیاهچه‌ها، نسبت دادند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، محتوای فلاونوئیدی گیاهچه‌های تحت تیمار با تمام غلظت‌های نانو اکسید روی نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. این مشاهدات با نتایج حاصل از تیمار گیاهچه‌های ازمک با غلظت‌های مختلف یون روی که نشان داد، محتوای فلاونوئیدی گیاهچه‌ها، هماهنگ با افزایش غلظت یون روی در محیط افزایش یافته است، مغایرت دارد (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳). در مقابل با کاهش محتوای فلاونوئیدی، محتوای آنتوسیانین گیاهچه‌های تیمار شده تا غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذر اکسید روی نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش و در تیمار با بالاترین غلظت (۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است (شکل ۳). این مشاهدات (تغییر در محتوای فلاونوئیدی و آنتوسیانین) با نتایج گزارش شده توسط Mousavi Kouhi و همکاران (۲۰۱۵) مغایرت دارد. آنها نشان دادند که محتوای ترکیبات فنلی در گیاهچه‌های *Brassica napus* تیمار شده با نانوذر اکسید روی در مقایسه با نمونه شاهد تغییر نمی‌کند (Mousavi Kouhi et al., 2015). همان‌طور که در نتایج نشان داده شده است، محتوای سولفورافان (شکل ۱) و محتوای فلاونوئید (شکل ۲) تقریباً روند معکوسی را در گیاهچه‌های تحت تیمار با این نانوذر نشان می‌دهند. هماهنگ با این مشاهدات، رضایی و همکاران (۱۳۹۷) نیز افزایش محتوای سولفورافان و کاهش محتوای فلاونوئید در تیمار گیاه ازمک با جاسمونات را گزارش کردند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۷).

کاتالاز با تجزیه H_2O_2 به آب و اکسیژن در کاهش هیدروژن پراکسید نقش ایفا می‌کند (Scandalios et al., 1997). براساس نتایج (شکل ۴)، فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های تیمار شده با این نانوذر افزایش یافت. این مشاهده، با نتایج حاصل از تأثیر نانوذر اکسید آهن و اکسید مس بر گیاهچه‌های ازمک که نشان‌دهنده افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های تحت تیمار است مطابقت دارد (Aminizadeh et al., 2016). مطالعات گذشته نیز نشان داده

است که فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های ازمک تیمار شده با یون روی هماهنگ با غلظت این یون در محیط افزایش می‌یابد (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳). از طرف دیگر، نتایج تحقیق Rao و Shekhawat (۲۰۱۴) نشان داد که فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار گیاهچه‌های *Brassica juncea* با نانوذر اکسید روی کاهش یافت (Rao and Skekhawat, 2014).

از طرف دیگر، محتوای پروتئین‌های محلول در گیاهچه‌های تیمار شده با نانوذر اکسید روی در مقایسه با نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (شکل ۵). این نتایج با نتایج گزارش شده توسط ریاحی و همکاران (۱۳۹۳) مغایرت دارد. آنها گزارش کردند که محتوای پروتئین محلول گیاهچه‌های ازمک تحت تیمار با یون روی کاهش می‌یابد (ریاحی مدوار و همکاران، ۱۳۹۳). Stresty و Madhava Rao (۱۹۹۹) دریافتند که تولید برخی پروتئین‌ها مثل پروتئین‌های مقاوم به حرارت در سلول‌های ریشه *Pigeonpea* تیمار شده با روی افزایش می‌یابد (Sresty and Madhava Rao, 1999). همچنین، مطالعات نشان داده است که در تیمار گیاه *Phytolacca Americana* با کادمیوم، سنتز پروتئین‌های وابسته به استرس مانند پروتئین‌های شوک حرارتی القا می‌شوند تا نقش محافظت از پروتئین‌ها را به عهده داشته باشند و به‌عنوان چاپرون عمل نموده تا تاخوردگی صحیح پروتئین‌ها را تضمین نمایند (Zhao et al., 2011).

نتیجه‌گیری

از مجموع نتایج چنین بر می‌آید که در شرایط انجام آزمایش، نانوذر اکسید روی اثرات منفی مختلفی بر جوانه‌زنی، رشد گیاه و رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثری وابسته به غلظت بر روی این گیاه دارد. گیاه ازمک در غلظت‌های پایین این ذره (تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با القای ترکیب‌های آنتی‌اکسیدانی غیر آنزیمی مانند سولفورافان، آنتوسیانین و در غلظت‌های بالاتر از آن با فعال‌نمودن سیستم آنتی‌اکسیدان آنزیمی مثل کاتالاز تلاش می‌کند تا بر تنش اکسیداتیو القاشده در تیمار با این ذره غلبه کند. بنابراین کاهش رشد گیاه در معرض این ذره را می‌توان به

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان و در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام شده است. نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از آن دانشگاه محترم اعلام می‌دارند.

افزایش تنش اکسیداتیو در این شرایط نسبت داد. در هر صورت، مطالعات بیشتری لازم است تا مکانیسم دقیق اثر نانوذر اکسید روی بر رشد و سایر پارامترهای فیزیوشیمیایی گیاهان را توضیح دهد.

تشکر و قدردانی

منابع

ریاحی مدوار، ع.، نصیری بزنجانی، م. ا.، یوسفی، ک. و محمدی، م. (۱۳۹۳) بررسی قابلیت جذب یون‌های روی و نقره توسط گیاهچه‌های ازمک (*Lepidium draba* L.) و تأثیر این یونها بر خصوصیات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌ها. مجله سلول و بافت ۶: ۵۹-۷۰.

رضایی، ف.، لاهوتی، م.، ملکی، م. و گنجعلی، ع. (۱۳۹۷) تغییرات محتوای سولفورافان و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاهچه‌های ازمک (*Lepidium draba* L.) در پاسخ به جاسمونات. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۷: ۴۵-۵۶.

Aminizadeh, M., Riahi-Madvar, A. and Mohammadi, M. (2014) Effects of iron and copper ions on sulforaphane content and peroxidase activity in *Lepidium draba* seedlings. *Ethno Pharmaceutical Products* 1: 8-14.

Aminizadeh, M., Riahi-Madvar, A. and Mohammadi, M. (2016) Nano-metal oxides induced sulforaphane production and peroxidase activity in seedlings of *Lepidium draba* (Brassicaceae). *Progress in Biological Sciences* 6: 75-83.

Amooaghaie, R., Norouzi, M. and Saeri, M. (2017) Impact of zinc and zinc oxide nanoparticles on the physiological and biochemical processes in tomato and wheat. *Botany* 95: 441-455.

Ball, P. (2002) Natural strategies for the molecular engineer. *Nanotechnology* 13: 15-28.

Battke, F., Leopold K., Maier, M., Schidhalter, U. and Schuster, M. (2008) Palladium exposure of barley uptake and effects. *Plant Biology* 10: 272-276.

Bradford, M. M. (1967) Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254.

Broadle, M. R., White, P. J., Hammond, J. P. and Zilko, I. V. (2007) Zinc in plants. *New Phytologist* 173: 677-702.

Buzea, C., Pacheco, I. I. and Robble, K. (2007) Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases* 2: 17.

Candan, N. and Tarhan, L. (2003) Change in chlorophyll-carotenoid contents, antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels in Zn-stressed *Mentha pulegium*. *Turk Journal Chemistry* 27: 21-30.

Chehregani, A. and Malayeri, B. E. (2007) Removal of heavy metals by native accumulator plants. *International Journal of Agriculture and Biology* 9: 462-465.

Choi, D. G., Yoo, N. H. and De-los-reyes, B. (2004) The activities of antioxidant enzymes in response to oxidative stresses and hormones in paraquat-tolerant *Rehmannia glutinosa* plants. *Journal of Biochemistry and Molecular Biology* 37: 618-624.

Corredor, E., Testillano, P. S., Coronado, M. J., Gonzalez-Melendi, P., Fernandez-Pacheco, R., Marquina, C., Ibarra, M. R., Fuente, J. M., Rubiales, D., Perez-de-Luque, A. and Risueno, M. C. (2009) Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: In situ subcellular identification. *BMC Plant Biology* 9: 1-11.

Dhindsa, R. S., Plumb-dhindsa, P. and Thorpe, T. A. (1981) Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany* 32: 93-101.

Fahey, J. W., Haristoy, X., Dolan, P. M., Kensler, T. W., Scholtus, I., Stephenson, K. K., Talalay, P. and Lozniewski, A. (2002) Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular, and antibiotic-resistant strains of *Helicobacter pylori* and prevents benzo [a] pyrene-induced stomach tumors. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99: 7610-7615.

Fahey, J. W., Zalcmann, A. T. and Talalay, P. (2001) The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry* 56: 5-51.

Ferry, J. L., Craig, P., Hexel, C., Sisco, P., Frey, R., Pennington, P. L., Fulton, M. H., Scott, I. G., Decho, A. W., Kashiwada, S., Murphy, C. and Shaw, T. J. (2009) Transfer of gold nanoparticles from the water column to the estuarine food web. *Nature Nanotechnology* 4: 441-444.

- Foyer, C. H. and Noctor, G. (2011) Ascorbate and glutathione: The heart of the redox hub. *Plant Physiology* 155: 2-18.
- Gao, X., Dinkova-Kostova, A. T. and Talalay, P. (2001) Powerful and prolonged protection of human retinal pigment epithelial cells, keratinocytes, and mouse leukemia cells against oxidative damage: the indirect antioxidant effects of sulforaphane. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98: 15221-15226.
- Hirayama, T. and Shinozaki, K. (2010) Research on plant abiotic stress responses in the post-genome era: Past, present and future. *The Plant Journal* 61: 1041-1052.
- Hopkins, R. J., van Dam, N. M. and Van Loon, J. J. (2009) Role of glucosinolates in insect-plant relationships and multitrophic interactions. *Annual Review of Entomology* 54: 57-83.
- Inze, D. and Montagu, M. V. (1995) Oxidative stress in plants. *Current Opinion in Biotechnology* 6: 153-156.
- Jacobs, J. (2007) Ecology and Management of Whitetop (*Cardaria Draba* (L.) Desv.). US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Jamshidi Goharrizi, K., Riahi-Madvar, A., Rezaee, F., Pakzad, R., Jadid Bonyad, F. and Ghazizadeh Ahsaei, M. (2019) Effect of salinity stress on enzymes' activity, ions concentration, oxidative stress parameters, biochemical traits, content of sulforaphane, and CYP79 F1 gene expression level in *Lepidium draba* plant. *Journal of Plant Growth Regulation* 39: 1075-1094.
- Ji, S. and Ye, C. (2008) Synthesis, growth mechanism, and applications of zinc oxide nanomaterials. *Journal of Materials Science and Technology* 24: 457.
- King, L. J. and Hill, L. (1966) Weeds of the World. Biology and Control. Wiley, New York.
- Krizek, D. T., Britz, S. J. and Mirecki, R. M. (1998) Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of cv. new red fire lettuce. *Physiologia Plantarum* 103: 1-7.
- Krizek, D. T., Kramer, G. F., Upadyaya, A. and Mirecki, R. M. (1993) UV-B response of cucumber seedling grown under metal halide and high pressure sodium/deluxe lamps. *Physiologia Plantarum* 88: 350-358.
- Lee, W. M., An, Y. J., Yoon, H. and Kweon, H. S. (2008) Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): Plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27: 1915-1921.
- Liang, H. and Yuan, Q. (2012) Natural sulforaphane as a functional chemopreventive agent: Including a review of isolation, purification and analysis methods. *Critical Reviews in Biotechnology* 32: 218-34.
- Liang, H., Yuan, Q., Dong, H. and Liu, Y. (2006) Determination of sulforaphane in broccoli and cabbage by high-performance liquid chromatography. *Journal of Food Composition and Analysis* 19: 473-476.
- Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol* 148: 350-382.
- Lin, D. and Xing, B. (2007) Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* 150: 243-250.
- Lin, D. and Xing, B. (2008) Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology* 42: 5580-5585.
- MadhavaRa, K. V. and Srestry, T. V. S. (2000) Antioxidative parameters in the seedlings of pigeon pea (*Cajanus cajan* L. Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Science* 157: 113-128.
- Marschner, H. (1995) Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Ed. Academic Press, London.
- Mithen, R. (2001) Glucosinolates—biochemistry, genetics and biological activity. *Plant Growth Regulation* 34: 91-103.
- McGrath, S. P. and Cunliffe, C. H. (1985) A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36: 794-798.
- Mohammadi, M., Riahi-Madvar, A. and Pourseyedi, S. (2014) Elicitors induced sulforaphane production in *Lepidium draba*. *Asian Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences* 4: 64-70.
- Murashige, T. and Skoog, F. (1962) A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum* 15: 473-497.
- Munzuroglu, O. and Geckil, H. (2002) Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43: 203-213.
- Nasiri-Bezenjani, M., Riahi-Madvar, A., Baghizadeh, A. and Ahmadi, A. (2014) Rosmarinic acid production and expression of tyrosine aminotransferase gene in *Melissa officinalis* seedlings in response to yeast extract. *Journal of Agricultural Science and Technology* 16: 921-930.
- Nel, A., Xia, T., Madler, L. and Li, N. (2006) Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* 311: 622-627.
- Pandey, N., Singh, A. K., Pathak, G. C. and Sharma, C. P. (2002) Effect of zinc on antioxidant response in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Indian Journal of Experimental Biology* 40: 954-956.
- Radonic, A., Blazevic, I., Mastelic, J., Zekic, M., Skocibusic, M. and Maravic, A. (2011) Phytochemical analysis and antimicrobial activity of *Cardaria draba* (L.) Desv. volatiles. *Chemistry and Biodiversity* 8: 1170-1181.

- Rao, S. and Shekhawat, G. S. (2014) Toxicity of ZnO engineered nanoparticles and evaluation of their effect on growth, metabolism and tissue specific accumulation in *Brassica juncea*. Journal of Environmental Chemical Engineering 2: 105-114.
- Rask, L., Andreasson, E., Ekblom, B., Eriksson, S., Pontoppidan, B. and Meijer, J. (2000) Myrosinase: Gene family evolution and herbivore defense in Brassicaceae. Plant Molecular Evolution 42: 93-113.
- Rezaee, F., Lahouti, M., Maleki, M. and Ganjeali, A. (2018) Comparative proteomics analysis of whitetop (*Lepidium draba* L.) seedlings in response to exogenous glucose. International Journal of Biological Macromolecules 120: 2458-2465.
- Rout, G. R. and Das, P. (2003) Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism; Zinc. Agronomy and Soil Science 23: 3-11.
- Scandalios, J. G., Guan, L. and Polidoros, A. N. (1997) Catalases in plants: Gene structure, properties, regulation, and expression. In: Oxidative Stress and the Molecular Biology of Antioxidant Defenses. (ed. Scandalios, J. G.) Pp. 343-406. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Plainview, NY, USA.
- Scurfield, G. (1962) *Cardaria Draba* (L.) Desv. The Journal of Ecology 50: 489-499.
- Mousavi Kouhi, S. M., Lahouti, M., Ganjeali, A. and Entezari, M. H. (2015) Comparative effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk particles, and Zn^{2+} on *Brassica napus* after long-term exposure: Changes in growth, biochemical compounds, antioxidant enzyme activities, and Zn bioaccumulation. Water Air Soil Pollut 226: 364.
- Sresty, T. V. S. and Madhava Rao, K. V. (1999) Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeonpea. Environmental and Experimental Botany 41: 3-13.
- Weckx, J. E. J. and Clijsters, H. (1997) Zn phytotoxicity induces oxidative stress in primary leaves of *Phaseolus vulgaris*. Plant Physiology and Biochemistry 35: 405-410.
- Yang, L. and Watts, D. J. (2005) Particles surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. Toxicology Letters 158: 122-132.
- Yeh, C. T. and Yen, G. C. (2009) Chemopreventive functions of sulforaphane: A potent inducer of antioxidant enzymes and apoptosis. Journal of Functional Foods 1: 23-32.
- Zengin, F. K. and Munzuroglu, O. (2005) Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica 47: 157-164.
- Zhao, L. I., Sun, Y. L., Cui, S. X., Chen, M., Yang, H. M., Liu, H. M., Chai, T. Y. and Huang, F. (2011) Cd-induced changes in leaf proteome of the hyperaccumulator plant *Phytolacca americana*. Chemosphere 85: 56-66.

Effects of ZnO nanoparticles on sulforaphane content, biochemical and morphological properties of *Lepidium draba* seedlings

Mahshid Ghazizadeh Ahsaei¹, Ali Riahi-Madvar^{2,3*}, Elham Rezvannejad³, Fereshteh Jadid Bonyad¹

¹ Department of Biotechnology, Faculty of Science and Modern Technology, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

² Department of Molecular and Cell Biology, Faculty of Basic Sciences, Kosar University of Bojnord, Bojnord, Iran

³ Department of Biotechnology, Institute of Science and High technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

(Received: 20/10/2019, Accepted: 21/04/2020)

Abstract

Lepidium draba, a perennial plant belonging to the Brassicaceae family, contains high level of the glucosinolate glucoraphanin that after enzymatic hydrolysis produces sulforaphane. In this study, sulforaphane content, morphological and biochemical properties were analyzed of the treated *L. draba* seedlings which were grown for 7 days in the presence of different concentrations (0 (as control), 25, 50, 100, 250, 500 and 1000 mg/L) of nano zinc oxide (nZnO). Based on the results, seed germination rate was significantly reduced in the presence of concentrations more than 100 mg/L nanoparticle, so that it reduced about 30% in the presence of the highest doses of nZnO. Root and shoot lengths of the treated seedlings were also significantly decreased in compared to the control with the increase nanoparticles concentration in the medium, So that in the presence of the highest concentration, length of the root and shoot was to reduced about 70 and 60 % respectively. Moreover, it was also shown that chlorophyll, carotenoid and flavonoid contents were significantly decreased in treatment with all nanoparticle concentrations compared to the control. In contrast, the results shown that an increase in sulforaphane content in treated seedlings with the concentrations more than 100 mg/L nanoparticle compared to the control. Catalase activity was significantly increased in treated seedlings more than 100 mg/L nZnO concentration compared to the control, so that in the presence of the highest concentration, its activity increased more than 3 times. The positive effects of this particle were also seen on soluble protein concentration (in the presence of all nZnO concentrations) and anthocyanin content (up to 100 mg/L nZnO concentrations) in compared to the control sample. Furthermore, the amount of the absorbed Zn ion in the roots and shoots of the treated seedlings increased with the increase nanoparticle concentration in the medium. Overall, based on the increase sulforaphane and anthocyanin contents and activity of catalase, it seemed that surface adsorption or accumulation of these particles, induced oxidative stress which resulted in decreasing of seedling growth. So, it can be suggested that for determining the exact mechanism effects of nZnO on this plant, others physiological, biochemical and genetics parameters must be analysed.

Keywords: *Lepidium draba*, Zinc oxide nanoParticle, Sulforaphane

Corresponding author, Email: riahi.ali@gmail.com