Research Article

Nova Biologica Reperta 10(1): 33-46 (2023)

Print ISSN: 2423-6330/Online ISSN: 2476-7115

https://nbr.khu.ac.ir; Kharazmi University Press; DOI: 10.29252/nbr.10.1.33

مقاله پژوهشی

یافته‌های نوین در علوم زیستی

جلد ۱۰، شماره ۱، صفحات ۳۳ الی ۴۶ (۱۴۰۲)

انتشارات دانشگاه خوارزمی

ارزیابی فعالیت ضدقارچی فرم‌های نانو و توده‌ای مس‌اکسید در رقم روشن گندم

وجیهه گنجعلی[۱]، منیره چنیانی[۱]، پریسا طاهری[۲] و مریم مظاهری تیرانی[۳]

[۱]گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی‌مشهد، مشهد، ایران؛ [۲] گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ [۳]گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

مسئول مکاتبات: منیره چنیانی،cheniany@um.ac.ir

چکیده. گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات زیرکشت در جهان و ایران، هرساله توسط بیماری‌های زیادی از جمله بیماری‌های قارچی فوزاریوم تهدید می‌شود. با توجه به ویژگی های منحصربه فرد نانوذرات، نانوذره مس‌اکسید پتانسیل بالایی در خواص ضدباکتریایی و ضدقارچی از خود نشان می‌دهد. هدف از تحقیق حاضر بررسی مقایسه ای اثرضدقارچی نانوذره مس‌اکسید و فرم توده آن بر سرکوب قارچ *Fusarium calmorum* گندم است. به این منظورآزمایش گلدانی با تیمارهای ۴ سطح (۱۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر) نانوذره و فرم توده مس‌اکسید بر گندم رقم روشن آلوده به قارچ فوزاریوم صورت گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که بهترین مهار بیماری‌زایی ریشه در غلظت بالای نانوذرات نسبت به فرم توده آن صورت گرفت. غلظت‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم درلیتر نانوذرات مس‌اکسید به ترتیب، باعث بیشترین طول ساقه و ریشه و بیشترین وزن‌خشک بخش هوایی و ریشه شدند. تیمار با غلظت‌های میانه نانوذرات (۱۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر)، محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل‌کل، کاروتنوئید، ضریب پایداری‌کلروفیل، ضریب پایداری‌غشاء و محتوای نسبی آب برگ را افزایش داد. درحالی‌که با افزایش غلظت هردوفرم نانوذره و فرم توده، محتوای کلروفیل*b*، مالون‌دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن و پرولین نمونه ها افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت‌های کم و میانه فرم نانواکسیدمس بر مهار قارچ مذکور در گندم نسبت به فرم توده‌ای آن موفق‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی. گندم نان، سرکوب بیماری، مکانیسم دفاعی، نانوتکنولوژی، *Fusarium calmorum*

Evaluation of antifungal activity of nano and bulk forms of copper oxide in wheat (Roshan cultivar)

Vajiheh Ganjeali[1], Monireh Cheniany[1], Parisa Taheri[2] & Maryam Mazaheri-Tirani[3]

[1]Department of Biology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; [2]Department of Plant protection, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; [3]Department of Biology, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran

Correspondent author: Monireh Cheniany, cheniany@um.ac.ir

Abstract. Wheat (*Triticum aestivum* L.), as one of the most important cultivated crops in the world and Iran, is constantly threatened by many diseases, including *Fusarium* contamination. Due to the unique characteristics of nanoparticles, copper oxide nanoparticles show high antibacterial and antifungal properties. The purpose of this research was to comparatively investigate the antifungal effects of copper oxide nanoparticles and its bulk form on the suppression of *Fusarium calmorum* in wheat. For this purpose, a pot experiment was done with four levels (10, 250, 500, and 1000 mg L^{-1}) of nanoparticles and bulk form of copper oxide treatments in wheat (Roshan cultivar). The results showed that the maximum inhibition of root pathogenicity was observed in a high concentration of nanoparticles as compared to bulk form. The 250 and 500 mg L^{-1} concentrations of copper oxide nanoparticles caused the highest stem and root length and the highest dry weight of the aerial part and root, respectively. Treatment with 10 and 250 mg L^{-1} nanoparticles also increased the content of chlorophyll *a*, total chlorophyll, carotenoid, chlorophyll stability index, membrane stability coefficient, and relative leaf water content. While the content of chlorophyll *b*, malondialdehyde, hydrogen peroxide, and proline increased with the increasing concentration of both nanoparticle and bulk forms. The results of this research showed that the low and medium concentrations of nanoparticles were more successful in inhibiting the aforementioned fungus than the bulk form.

Key words. Defense mechanism, Disease suppression, *Fusarium calmorum,* Nanotechnology, Wheat

Received 09.07.2022/ Revised 13.08.2022/ Accepted 21.08.2022/ Published 20.06.2022

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸/اصلاح: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲/ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰/انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

مقدمه

امروزه رشد جمعیت جهان، خشک‌سالی، کمبود آب، محدودیت زمین‌های کشاورزی، تغییر اقلیم، بیماری‌ها و آفات تهدیدهای اصلی امنیت غذایی پایدار هستند. از این بین سهم بیماری‌ها و آفات، در کاهش عملکرد محصولات زراعی بین ۲۰ تا۴۰ درصد گزارش شده است (Borgatta et al., 2018). گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از گسترده‌ترین و مهم‌ترین غله کشت شده و ماده غذایی اصلی برای مصرف انسان در سراسر جهان است که به‌عنوان منبع اصلی کربوهیدارت‌ها و منبع قابل-توجهی از پروتئین‌ها، یون‌ها و ویتامین‌ها درنظر گرفته می‌شود (Kumar et al., 2011). همچنین گندم (*T. aestivum*) به عنوان یکی از محصولات کلیدی، نقش مهمی در زنجیره غذایی ساکنان مناطق شهری و روستایی ایران دارد (Ghahremaninejad et al., 2021). علی‌رغم افزایش عمده عملکرد این محصول در سال‌های اخیر برخی از مشکلات از جمله تنش‌های زیستی و در این میان بیماری‌ها و عوامل درگیرکننده ریشه‌ی گندم پتانسیل عملکرد این محصول را کاهش داده است (Parry et al., 1995).

فوزاریوم (*Fusarium* spp.) یکی از مهم‌ترین قارچ‌های بیماری‌زا است که موجب پوسیدگی طوقه و ریشه گندم می‌شود. با توجه به تغییرات آب‌وهوایی ناشی از گرم شدن کره زمین و رطوبت بالا، شرایط مطلوب برای گسترش این بیماری در سراسر جهان فراهم شده‌است (Desai et al., 2020). شروع عفونت گونه‌های فوزاریوم در گندم با کلونیزه‌کردن میانگره‌های پایینی و ایجاد نکروز در قسمت ریشه و در نهایت پوسیدگی طوقه هستند (Winter et al., 2019). اثر منفی گونه‌های بیماری‌زای *Fusarium* spp. در کشاورزی به دلیل متابولیت‌های ثانوی (مایکوتوکسین‌ها) از جمله دئوکسی نیوالنول(DON)، نیوالنول (NIV)، سم (T-2) و زئارالنون (ZEN) است (Ksieniewicz-Woźniak et al., 2021). از اثرات مایکوتوکسین ها بر سلول‌های یوکاریوتی می‌توان به مهار سنتز پروتئین، RNA و DNA، مهار عملکرد میتوکندری، تاثیر بر تقسیم سلولی و عمل غشاء و همچنین القای آپوپتوز اشاره داشت. بسیاری از مایکوتوکسین‌ها از جمله فومونیزین‌ها و تریکوتسن‌ها در برابر حرارت مقاومت دارند از این رو تنها راه جلوگیری از تاثیر آن‌ها، جلوگیری یا کاهش تولید و گسترش آن‌ها در مزارع کشاورزی است (Pellan et al., 2020). *F. calmoru*م یکی از ۲۰ گونه‌ی مهم فوزاریوم است که باعث پوسیدگی طوقه و ریشه و در نهایت مرگ گیاهچه می‌شود. این گونه یک قارچ همی‌بیوتروف است که به گیاهان گندم (*T. aestivum*)، جو (*Hordeum sativum* L.) و ذرت (*Zea mays* L.) حمله می‌کند. ماکروکنیدی کوتاه با دیواره ضخیم ایجاد می‌کند که دارای سطح شکمی و پشتی خمیده است (Wagacha et al., 2007). این قارچ می‌تواند به صورت کلامیدوسپور، کنیدیوم و میسیلیوم در خاک، همچنین در باقی‌مانده‌های گیاه میزبان و در بذر گندم (*T. aestivum*) و جو (*H. sativum*) وجود داشته باشد. آلودگی‌های طوقه و ریشه گندم می‌تواند در اوایل مرحله گیاهچه‌ای اتفاق بیافتد و در ادامه باعث مرگ گیاهچه شود (Scherm et al., 2013). چندین راه‌کار برای مدیریت بیماری فوزاریوم و مایکوتوکسین تولید شده، از جمله تناوب زراعی، مقاومت ژنتیکی، استفاده از عصاره‌های گیاهی و اسانس‌ها، کنترل شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌گردد. اخیراً مطالعات مختلفی از فناوری نانو در کنترل بیماری‌های گیاهی استفاده شده است. استفاده هوشمندانه از موادشیمیایی در مقیاس نانو می‌تواند راه‌حل مناسبی برای غلبه بر این مشکل باشد (Tiwari et al., 2020).

نانوتکنولوژی ابزاری خارق‌العاده است که با تغییر در خواص مواد (مقیاس، توزیع و شکل ذرات)، امکانات فوق‌العاده‌ای را برای استفاده آن در زمینه‌های مختلف فراهم می‌کند (Ibrahim et al., 2022). نانوذرات اکسیدفلزی به دلیل کاربرد قابل‌توجه آن‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله علوم زیستی، پزشکی، فناوری موادغذایی، الکترونیک، علوم انرژی، صنایع‌شیمیایی، انتقال دارو و حسگرهای زیستی از محبوبیت گسترده‌ای برخوردار هستند (El Shafey et al., 2020). همچنین مطالعات پایه‌ای نشان داده است که استفاده از ذرات نانو فلزی می‌تواند در افزایش تولید بذر، رشد و حمایت گیاه، افزایش مقاوت در برابر بیماری و آفات و تشخیص باقی‌مانده علف‌کش‌ها در زمینه زیست‌شناسی گیاهی و کشاورزی کاربرد داشته باشد (Ashkanvand et al., 2019). از این بین اثرات ضدمیکروبی ذرات نانوفلزی بر روی قارچ‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است (Kazemian et al., 2019).

عنصر مس به دلیل چند عملکرد بودن آن یک ریزمغذی کلیدی و ضروری برای گیاهان است که در فرآیندهای فیزیولوژیکی متعدد مانند فتوسنتز، تنفس، متابولیسم کربن و نیتروژن، ساخت پروتئین‌ها، لیپید و هورمون‌ها، بیان ژن، استحکام ساختاری و عملکردی غشاهای زیستی، محافظت در برابر تنش اکسیداتیو و مسیرهای مهم دفاعی (فعال‌سازی آنزیم‌ها شروع خط دفاعی)، و سوخت وساز اُکسین نقش دارد (Asadi et al., 2013). نانوذرات اکسیدمس (CuO NPs) خواص فیزیکی و شیمیایی جذابی از جمله سطح بزرگ، پتانسیل ردوکس مناسب، فعالیت الکتروشیمیایی عالی، رسانایی فوق‌گرمایی و پایداری خوب از خود نشان می‌دهند. که در

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

زمینه‌هایی از جمله کاتالیز، فعالیت‌های ضدقارچی و ضدباکتریایی و پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی موفق بوده است (Badawy et al., 2021). گزارش شده است پتانسیل ضدقارچی CuO NPs در مقابل انواع وسیعی از قارچ‌ها به دلیل نسبت بسیاربالا سطح به حجم است به گونه‌ای‌که سلول قارچی را با تخریب غشاء سلولی، تشکیل کمپلکس با پروتئین و تخریب ماده ژنتیکی از بین می‌برد و به عنوان یک عامل ضدمیکروبی مستقیم به شمار می رود (Bondarenko et al., 2012). همچنین اثرات ضدقارچی CuO NPs بیشتر از سایر نانوذرات مانند آلومینیوم، آهن، روی، نیکل، منگنز گزارش شده است (Viet et al., 2016). نکته حائز اهمیت آن است که CuO NPs در غلظت‌های بهینه برای پستانداران بی‌خطر است و تنها فعالیت ضدقارچی آن بر انواع قارچ‌ها قابل تآمل است (Hsiao et al., 2006). بر پایه نتایج یک مطالعه گلخانه‌ای مشخص شد که استفاده از CuO NPs به صورت محلول‌پاشی، منجر به کاهش بیماری (۷۰درصد) ناشی از قارچ *F. oxysporum* f. sp. Lycopersici و *Alternaria solani* و افزایش رشد در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) می‌شود (Saharan et al., 2015). نتایج حاصل از بررسی اثر ضدقارچی CuO NPs بر هندوانه (*Citrullus lanatus*) آلوده به *F. oxysporum* f. sp. niveum نشان داد که استفاده از این نانوذرات در غلظت‌های کم (۱۰ میلی‌گرم درلیتر)، منجر به کاهش بیماری می‌شود (Borgatta et al., 2018). تایید شده است بیان وابسته به زمان سه ژن دفاعی گیاه گوجه‌فرنگی [فعال‌کننده رونویسی ژن‌های مرتبط با پاتوژنز (PTI5)، پلی‌فنل-اکسیداز (PPO) و پروتئین مقاومت گیاهی A1 (PRP1A1)] به طور منحصر به‌فردی توسط CuO NPs تعدیل شده است (Ma et al., 2019). در پژوهشی اثر فعالیت ضدقارچی CuO NPs بر سرکوب قارچ *Alternaria solani* در شرایط آزمایشگاهی (رشد میسیلیوم قارچ و جوانه‌زنی اسپور) و اثرات فیزیولوژیکی این ذرات نانو بر بذر گندم (*T. aestivum*) موردبررسی قرار گرفت و معلوم گردید که مهار جوانه‌زنی اسپور قارچ به میزان ۳۴ الی ۵۰ درصد، بهبود جوانه‌زنی بذر، افزایش طول ریشه و ساقه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله پیامدهای استفاده از این نانوذرات بود (Zakharova et al., 2019). اثر ضدقارچی CuO NPs در شرایط آزمایشگاهی بر روی قارچ‌های *Penicillium italicum* و *Penicillium digitatum*، *Neofusicoccum* sp.، *F. oxysporum*، *F. solani* با کاهش رشد قارچ، تغییرات مورفولوژیکی میسیلوم‌ها همراه بود (Chalandar et al., 2017; Pariona et al., 2019). در نهایت باید اذعان داشت که سرعت پیشرفت و گسترش علم نانوتکنولوژی و اثرات گسترده آن فرصت‌هایی را برای کشف اثرات ضدقارچی نانوذرات فلزی ایجاد کرده است. هدف از انجام این پژوهش توانایی CuO NPs در مقایسه با فرم توده‌ای آن، در مهار و کنترل قارچ *F. calmorum* در گندم (*T. aestivum*) به عنوان مهم‌ترین غله زیرکشت است تا شاید بتوان تا حد بسیار زیادی از این ویژگی در جهت کنترل خسارت‌های قارچی بر غلات و به ویژه گندم بهره برد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر پیش‌تیمار بذری CuO NPs و فرم توده ای آن (CuO bulk) بر مهار قارچ *F. culmorum* گندم، در قالب طرح کاملا تصادفی به اجراء در آمد. نانوذرات CuO NPs و فرم توده از شرکت 'نانوتک ایتالیا' خریداری شدند. بذرگندم رقم 'روشن' از سایت بوجاری اتحادیه تعاونی واقع در شهرستان خاتم یزد و جدایه قارچ *F. culmorum*از کلکسیون بخش بیماری‌های گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد تهیه شد.

پیش‌تیمار بذری با فرم های مختلف مس‌اکسید

در ابتدا بذرهای گندم در اتانول۷۰ درصد (v/v)(۱دقیقه) و هیپوکلریت سدیم ۰/۱۲۵ درصد (w/v)(۱۰دقیقه) ضدعفونی و سپس با آب‌مقطر استریل، شست وشو داده شدند (Soltani et al.,2016). جهت تهیه غلظت‌های۱۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر، مقدار مشخص فرم‌های نانومس‌اکسید و توده آن در آب دیونیزه حل و به مدت ۴۰ دقیقه و دمای ۳۰درجه سانتی‌گراد، در حمام التراسونیک قرار داده شد. پس از آن بذور جهت پیش‌تیمار بذری، به مدت ۱ ساعت در محلول‌های مذکور قرار گرفتند و پس از پایان این زمان آماده کشت شدند.

تهیه مایه قارچ

منظور تکثیر، جدایه قارچ *F. culmorum* در محیط PDA، دیسک‌های ۷ میلی‌متری از قارچ خالص‌سازی شده، برداشته و در شرایط استریل در محیط کشت PDA کشت شدند و در انکوباتور با دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز قرار داده شدند. به منظور تهیه مایه قارچ از روش آلوده‌کردن بذور گندم به قارچ استفاده گردید. بر طبق این روش، ابتدا بذرهای گندم به مدت ۲۴ ساعت در آب‌مقطر خیسانده شد. سپس دو روز متوالی در اتوکلاو (دما ۱۲۱درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر) سترون شدند. پس از آن دیسک‌های میسلیومی به قطر ۴ میلی‌متر از کشت‌های ۷روزه جدایه‌ها از روی محیط کشت PDA برداشته و به هر پتری‌دیش حاوی ۱ گرم گندم‌های سترون اضافه گردید. پتری‌دیش‌ها به مدت ۲ هفته در فضای انکوباتور با دمای ۲۸

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Dehghanpour-farashah et al., 2019).

مایه‌زنی گیاهان

به‌منظور آماده‌سازی بستر کشت، مخلوط خاک شن-رس با نسبت حجمی مساوی (۱:۱) تهیه و تحت دما ۱۲۱ درجه سانتی گراد و فشار یک اتمسفر استریل شد. میزان مس قابل‌جذب در خاک مورد استفاده، ۱/۶ میلی‌گرم برکیلوگرم است. گلدان‌های ضدعفونی‌شده با اتانول ۳۰ درصد (v/v) به عنوان یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. جهت مایه‌زنی گیاهان با قارچ *F. culmorum* ، میزان ۳ گرم بذر گندم کلونیزه‌شده به ازای هر بذر کشت داده‌شده، در عمق ۳ سانتی‌متری از خاک سترون هر گلدان قرار گرفت. سپس تعداد ۱۰ عدد بذر پیش تیماریافته با نانوذرات در گلدان‌های مایه‌زنی‌شده با قارچ کشت شد. گلدان بدون هرگونه تیمار قارچی و پیش تیمار نانوذرات به عنوان کنترل مثبت و گلدان‌هایی که فقط دارای تیمار با قارچ بودند، به‌عنوان کنترل‌منفی در نظر گرفته شد. گلدان‌ها در فضای گلخانه تحقیقاتی با دما ۲۵درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از گذشت ۳۰روز جهت بررسی عوامل رشد و فیزیولوژیکی برداشت و وزن‌تر و خشک با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارتفاع بخش‌هوایی و ریشه با خط‌کش میلی‌متری بررسی شد. شدت بیماری‌زایی ریشه براساس تغییر رنگ ریشه و طوقه و برمبنای مقیاس ۵ درجه‌ای مورد بررسی قرارگرفت (Boukaya et al., 2018). به این ترتیب که برای هریک از واحدهای آزمایشی و برمبنای تغییر رنگ ریشه و طوقه درجه‌ای از ۰ تا ۵ داده شد. درجه ۰ این مقیاس= مربوط به ریشه‌های سالم فاقد هرگونه علامت قابل مشاهده بود و درجه ۱= ۱تا ۲۵درصد، درجه ۲=۲۶ تا ۵۰ درصد، درجه ۳= ۵۱ تا ۷۵ درصد و درجه ۴= بیشتر از ۷۶ درصد تغییر رنگ طوقه و ریشه را نشان دادند و در نهایت درجه ۵ این مقیاس به گیاهان مرده اختصاص یافت. شدت بیماری‌زایی توسط معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{شدت بیماری‌زایی (درصد)} = \sum (R \times N) \times 100/(H \times T)$$

در این معادله، R: درجه اختصاص یافته به تکرار این مطالعه، N: تعداد تکرارهای یک تیمار که درجه موردنظر را دارد، H: بالاترین درجه در نظرگرفته‌شده در این مطالعه (درجه ۵) و T: تعداد کل تکرارهای مطالعه شده برای یک تیمار است.

سنجش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

محتوا رنگیزه های فتوسنتزی

جهت سنجش محتوای کلروفیل‌ها، برگ‌ها پس از توزین، به همراه استون ۸۰ درصد (v/v) سائیده شد. محلول هموژن حاصل در ۳۵۰۰ دوردردقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس از محلول روشناور جهت تعیین محتوای کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر استفاده شد. محتوای کلروفیل‌های *a*، *b*، کلروفیل‌کل و کاروتنوئیدها با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه گردید و مقادیر آن‌ها بر حسب میلی‌گرم برگرم‌وزن‌تر نمونه بیان شد (Arnon, 1967). ضریب پایداری کلروفیل نیز از نسبت میزان کلروفیل‌کُل در شرایط تنش به میزان کلروفیل‌کُل در شرایط بدون تنش محاسبه گردید (Terzi and Kadioglu, 2006).

$$\text{Chlorophyll } a = (12.7 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645})\ V/W \times 1000$$

$$\text{Chlorophyll } b = (22.9 \times A_{645} - 2.68 \times A_{663})\ V/W \times 1000$$

$$\text{Carotenoids} = [1000\ (A_{470}) - 1.82\ (\text{mg chl. a}) - 85.02\ (\text{mg chl. b})]/198$$

$$\text{Chlorophyll T} = [20.2\ (A_{645}) + 8.02\ (A_{663})\ V/W] \times 1000$$

در این معادله؛ V= حجم نهایی عصاره استونی؛ A= جذب نور در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر؛ W = وزن‌تر نمونه بر حسب گرم است.

محتوای نسبی‌آب برگ

به منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی‌آب، برگ راسی در پتری‌های پرشده با آب‌مقطر غوطه‌ور شدند. بعد از گذشت ۲۴ساعت، برگ‌ها از آب خارج و وزن آن‌ها در حالت اشباع اندازه‌گیری شد. سپس برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دما ۷۰ درجه‌ی سانتی گراد خشک گردیدند و وزن‌خشک آن‌ها اندازه‌گیری و محتوای نسبی آب برگ‌ها (درصد) براساس معادله زیر محاسبه شد:

$$\%\ RWC = [(F.W.-D.W.) / (T.W.-D.W.)] \times 100$$

در این معادله؛ RWC محتوای نسبی آب، F.W. وزن‌تر برگ، D.W. وزن‌خشک برگ و T.W. وزن‌برگ در حالت تورژسانس کامل است (Smart and Bingham., 1974).

شاخص پایداری غشاء

جهت تعیین شاخص پایداری غشاء سلولی، ۰/۱ بافت تر برگ به دو گروه لوله آزمایش حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه انتقال داده شد. گروه اول لوله‌ها به مدت ۳۰ دقیقه دربن‌ماری با دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد و لوله‌های گروه دوم به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری با دما ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از تعدیل دما، هدایت‌الکتریکی آن‌ها با دستگاه EC متر (مدلJenway) اندازه‌گیری و طبق معادله‌ی زیر میزان شاخص پایداری غشاء (Azizpour et al., 2010) ارزیابی شد.

$$\text{شاخص پایداری غشاء} = 1\text{-}(EC_1 / EC_2) \times 100$$

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

در این معادله؛EC_1 هدایت‌الکتریکی اولیه و EC_2 هدایت-الکتریکی ثانوی است.

محتوای پراکسید هیدروژن

محتوای پراکسیدهیدروژن براساس واکنش پراکسیدهیدروژن با یدید پتاسیم (KI) تعیین شد. در این روش ۰/۵ گرم از بافت تازهٔ برگ در تری‌کلرواستیک‌اسید ۰/۱ درصد (w/v) سرد سائیده شد. عصاره‌ی حاصل به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دوردر دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس به ۵۰۰ میکرولیتر از محلول رویی، ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار (pH = ۷) و ۱ میلی‌لیتر یدورپتاسیم (KI) ۱ مولار اضافه گردید. جذب هر نمونه در طول‌موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد و طبق معادله زیر و با استفاده از ضریب خاموشی ($mM\ cm^{-1}$ ۰/۲۸۸) مقدار پراکسید هیدروژن بر اساس میکرومول در گرم وزن تر محاسبه شد (Velikova et al., 2000).

$A= \varepsilon bc$

در این معادله؛ A: جذب نمونه مورد نظر؛ ε: ضریب خاموشی؛ b: عرض کووت ۱ سانتی‌متر؛ c: غلظت برحسب میکرومول درگرم وزن‌تر است.

محتوای مالون‌دی‌آلدئید

سنجش پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء براساس تشکیل کمپلکس مالون‌دی‌آلدئید حاصل از پراکسیداسیون لیپیدهای‌غشاء با اسیدتیوباربیتوریک انجام شد. به این منظور بافت تر برگ با اسیدتری‌کلرواستیک ۰/۱ درصد (w/v) همگن شد. هموژن حاصل به مدت ۵ دقیقه و در۱۰۰۰۰ دور دردقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس محلول‌شناور با محلول اسیدتری‌کلرواستیک ۲۰ درصد (w/v) که حاوی اسیدتیوباربیتوریک ۰/۵ درصد (w/v) بود، مخلوط شد. محلول حاصله به مدت ۳۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از این مرحله تا رسیدن به دما محیط به حمام یخ منتقل شد. در مرحله بعد مجددا به مدت ۱۰ دقیقه و در ۱۰۰۰۰ دوردردقیقه سانتریفیوژ شد. جذب نوری هر یک از نمونه‌ها در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر خوانده شد. جذب سایر ترکیبات غیراختصاصی، در ۶۰۰ نانومتر از میزان جذب در ۵۳۲ نانومتر کسر شد. در نهایت برای محاسبه غلظت مالون‌دی‌آلدئید، از ضریب‌خاموشی (µM $^{-1}$۰/۱۵۵cm) استفاده و براساس واحد میکرومول درگرم وزن‌تر محاسبه شد (Health and Packer, 1968).

غلظت پرولین

برای استخراج پرولین ابتدا ۰/۲ گرم از بافت‌تر برگ در ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوسالیسیلیک ۳ درصد (w/v) سائیده شد تا همگنای یکنواختی به‌دست‌آمد. سپس هموژن حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دوردردقیقه سانتریفیوژ شد. ۲ میلی‌لیتر از محلول روشناور به دست آمده با ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک خالص به مدت یک ساعت در بن‌ماری با دما ۱۰۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس نمونه‌ها بلافاصله به ظرف حاوی یخ منتقل شد تا واکنش خاتمه یابد. سپس به هر نمونه، ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و به مدت ۳۰ ثانیه ورتکس شد. پس از مدت ۲۰ دقیقه، جذب‌نوری محلول فوقانی با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد و با استفاده از منحنی استاندارد، غلظت پرولین براساس میکرومول در گرم‌وزن‌تر نمونه گیاهی، مطابق معادله زیر محاسبه شد(Bates et al., 1973).

میکرومول پرولین در گرم وزن تر نمونه
=[Prolin (µg)/ml ×Toloen(*ml*)/115/5(µg/µmol)]/sample(g)/5

تجزیه وتحلیل آماری داده‌ها

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از آنالیز واریانس (ANOVA) و نرم‌افزار SPSS استفاده شد. میانگین داده‌ها توسط آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال خطاء $P \leq 0.05$مقایسه شدند.

نتایج

در بررسی نتایج حاصل از آنالیز واریانس، تمامی غلظت‌های نانوذرات مس اکسید و فرم توده‌ای آن اثر معنی‌داری بر پارامترهای شاخص‌رشد (طول، وزن‌تر، وزن‌خشک بخش‌هوایی و ریشه) و همچنین درصد بیماری‌زایی ریشه نمونه‌ها نسبت به شاهد در سطح احتمال خطاء $P \leq 0.05$ داشتند (جدول۱). در تیمار نانوذرات مس-اکسید در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر، بیش‌ترین طول ساقه مشاهده شد. درحالی‌که غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم درلیتر نانوذرات باعث بیشترین افزایش طول ریشه شد. همچنین بیشترین وزن‌خشک بخش هوایی و ریشه به ترتیب در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم درلیتر نانوذرات به ثبت رسید و بیشترین وزن‌تر آن‌ها نیز در غلظت-های ۱۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر CuO NPs مشاهده شد. این در حالی است که کمترین مقدار همه شاخص‌های رشد در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر فرم توده ذرات اکسید مس مشاهده شد. بر طبق بررسی نتایج، کاهش موفقیت‌آمیز در مهار بیماری‌زایی ریشه در غلظت‌های بالا فرم CuO NPs (۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر) نسبت به فرم توده، از دیگر نتایج قابل توجه پژوهش حاضر بود به-طوری‌که با افزایش غلظت نانوذرات، درصد بیماری‌زایی ریشه به طور قابل‌توجهی کاهش یافت (جدول ۱). این نتایج در چکیده ارایه شده توسط نویسندگان (Ganjeali et al., 2022) ارایه شده است. نمایی از گندم طبیعی، گیاه آلوده به قارچ و گیاهان تیمارشده در شکل ۱ ارایه شده است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]



شکل ۱- نمایی از گندم (رقم روشن) طبیعی (کنترل مثبت)، گیاه آلوده به قارچ (کنترل منفی)، گیاهان تیمارشده با نانوذرات مس‌اکسید (nCuO) و گیاهان تیمارشده با فرم توده ذرات مس‌اکسید (bCuO).

Figure 1. View of natural wheat (Roshan cultivar) (Positive Control), fungal-infected plant (Negative Control), plants treated with copper oxide nanoparticles (nCuO), and plants treated with bulk form of copper oxide particles (bCuO).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

بررسی‌های پژوهش حاضر نشان داد که محتوای کلروفیل *a* در تمامی غلظت‌های مس‌اکسید (فرم نانو و توده) نسبت به شاهد افزایشی است. به‌طوری‌که بیشترین غلظت کلروفیل *a* مربوط به غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر CuO NPs (۰/۳۸ ± ۲۵/۱۶ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) و کمترین مقدار متعلق به کنترل منفی (گیاه شاهد دارای تیمار قارچ) (۰/۷۸ ± ۶/۹۲ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) و به دنبال آن، تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر فرم توده ذرات (۰/۴۴ ± ۹/۱۴ میلی گرم برگرم وزن‌تر) بود (شکل ۲A). بیشترین محتوای کلروفیل *b* در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر فرم CuO bulk (۰/۹۰ ± ۱۷/۶۹ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) و کمترین مقدار آن در غلظت ۱۰ میلی‌گرم درلیتر CuO NPs (۰/۷۰ ± ۱۱/۷۳ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) و کنترل مثبت (۰/۹۹ ± ۹/۴۶ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) ثبت شدند. بیشترین و کمترین محتوای کلروفیل‌کل نیز به ترتیب در تیمار غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر CuO NPs و نمونه شاهد منفی مشخص شد (شکل ۲C). با افزایش غلظت هر دو فرمCuO NPs و CuO bulk ، ضریب‌پایداری‌کلروفیل نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین ضریب‌پایداری‌کلروفیل در غلظت ۱۰ میلی‌گرم درلیتر فرم نانو ذرات (۱/۱۴ ± ۳۸/۶۵ میلی‌گرم برگرم وزن‌تر) مشخص گردید. تیمارهای نانو ذرات و فرم توده، محتوای کارتنوئید نمونه های تیمارشده را در مقایسه با نمونه های شاهد افزایش دادند ولیکن سطح این تغییرات در تیمار با نانوذرات بیشتر از فرم توده آن بود (شکل ۲E).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

جدول ۱- تأثیر تیمار با نوذرات مس اکسید (nCuO) و فرم توده‌ای آن (bCuO) بر برخی صفات رشد و درصد بیماری‌زایی در گندم رقم روشن. مقادیر میانگین سه تکرار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر مبنای آزمون دانکن در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است. nCuO فرم نانو ذرات و bCuO فرم توده‌ای ذرات است.

Table 1. Effect of copper oxide nanoparticles and copper oxide bulk on the growth and disease severity indices in wheat (Roshan cultivar). Each data is the mean of 3 independent replicates; values with the same letter did not significantly differ at $P \leq 0.05$ levels based on the Duncan test. nCuO is the nanoparticle form and bCuO is the bulk form of the particle.

Treatment (mg L^{-1})	Stem Length (Cm)	Root Length (Cm)	Shoot Dry Weight (g)	Root Dry Weight (g)	Shoot Fresh Weight (g)	Root Fresh Weight (g)	Disease Severity Index (%)
Positive Control	28.8333 ^{f}	18.31 ^{g}	0.2107 ^{f}	0.0467 ^{e}	3.1667 ^{f}	1.95 ^{g}	0
Negative Control	25.4333 ^{g}	12.16667 ^{h}	0.1377 ^{g}	0.0267 ^{f}	1.8033 ^{g}	0.76 ^{h}	99.8767 ^{a}
nCuO 10	36.4333 ^{b}	24 ^{d}	0.407 ^{b}	0.10 ^{c}	6.2333 ^{a}	4.5533 ^{b}	84.4533 ^{b}
nCuO 250	37.8333 ^{a}	26.16667 ^{b}	0.5057 ^{a}	0.11 ^{b}	5.3067 ^{b}	5.7267 ^{a}	65 ^{d}
nCuO 500	35.1333 ^{bc}	28.03833 ^{a}	0.2837 ^{d}	0.12 ^{a}	4.39 ^{d}	3.2777 ^{d}	39.1867 ^{e}
nCuO 1000	30.5 ^{e}	22 ^{e}	0.2173 ^{f}	0.0677 ^{d}	3.25 ^{e}	2.3967 ^{fg}	26.6667 ^{f}
bCuO 10	34.5 ^{cd}	25.08333 ^{c}	0.4213 ^{b}	0.1 ^{b}	4.97 ^{bcd}	3.97 ^{c}	87.59 ^{b}
bCuO 250	33.175 ^{d}	24.25 ^{cd}	0.3207 ^{c}	0.0767 ^{cd}	4.4577 ^{cd}	3.0257 ^{de}	76.35 ^{c}
bCuO 500	31.5167 ^{e}	21.83333 ^{e}	0.275 ^{d}	0.0673 ^{d}	5.217 ^{bc}	2.57 ^{ef}	61.9567 ^{cd}
bCuO 1000	30.1667 ^{e}	20.33333 ^{f}	0.25 ^{e}	0.0433 ^{e}	3.3543 ^{e}	2.3 ^{fg}	56.4767 ^{d}

مجموعه شاخص‌های بیوشیمیایی

محتوای نسبی آب برگ: بررسی محتوای نسبی آب نشان داد که آلودگی با قارچ (کنترل‌منفی) موجب کاهش این صفت (نسبت به کنترل‌مثبت) می‌گردد. همچنین تیمار با هر دو فرم CuO NPs و CuO bulkبر گیاهان آلوده شده با قارچ، موجب افزایش محتوای نسبی آب شد. به‌طوری‌که بیشترین مقدار به ثبت رسیده در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر فرم نانوذرات و ۳/۷۱ برابر نمونه شاهد منفی بود. این درحالی است که در بیشینه اثر فرم توده ای ذرات (غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیتر) بر محتوای نسبی آب، افزایش ۳/۳۷ برابری نسبت به کنترل منفی مشاهده شد (شکل ۳A).

ضریب پایداری غشاء: با افزایش غلظت تیمارهای CuO NPs و فرم CuO bulk بر گیاهان آلوده به قارچ، روند کاهشی در ضریب پایداری غشاء مشاهده شد به‌طوری‌که بیشینه شاخص پایداری غشاء در حضور غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم درلیترفرم نانو و نیز در غلظت ۱۰ میلی‌گرم درلیتر فرم توده به ثبت رسید که به ترتیب ۳ و ۲/۷۱ برابر نمونه شاهد منفی بودند (شکل ۳B).

محتوای پراکسید هیدروژن: در بررسی نتایج حاصل از تیمار نانوذرات مس اکسید مشخص گردید که با افزایش غلظت CuO NPs و CuO balk، افزایش معناداری در محتوای پراکسید هیدوژن حاصل می‌گردد. بیشترین غلظت تیماری از هر دو فرم ذرات مس اکسید (۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر) موجب بیشینه انباشتگی پراکسیدهیدروژن در برگ های گندم آلوده به قارچ شدند. نکته‌قابل‌توجه آن که، سطح پراکسیدهیدروژن اندازه‌گیری شده در نمونه شاهد منفی(آلوده به قارچ) بیشتر از نمونه شاهد مثبت (گیاه طبیعی) بود (شکل ۳C).

محتوای مالون‌دی‌آلدئید: روند تغییرات محتوای مالون‌دی-آلدئید در گیاهان آلوده، کاملا مشابه با روند تغییرات محتوای پراکسیدهیدروژن بود و براین‌اساس، با افزایش غلظت تیمارهای نانوذرات و فرم توده، روند افزایشی در این صفت دیده شد. درصد افزایش محتوای در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر CuO bulk به ترتیب ۲۱۷/۷۹ و ۱۵۴/۰۶ و در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر CuO NPs به ترتیب ۱۶۴/۳۰ و ۱۱۱/۲۹ در مقایسه با کنترل مثبت و کنترل منفی بودند (شکل ۳D).

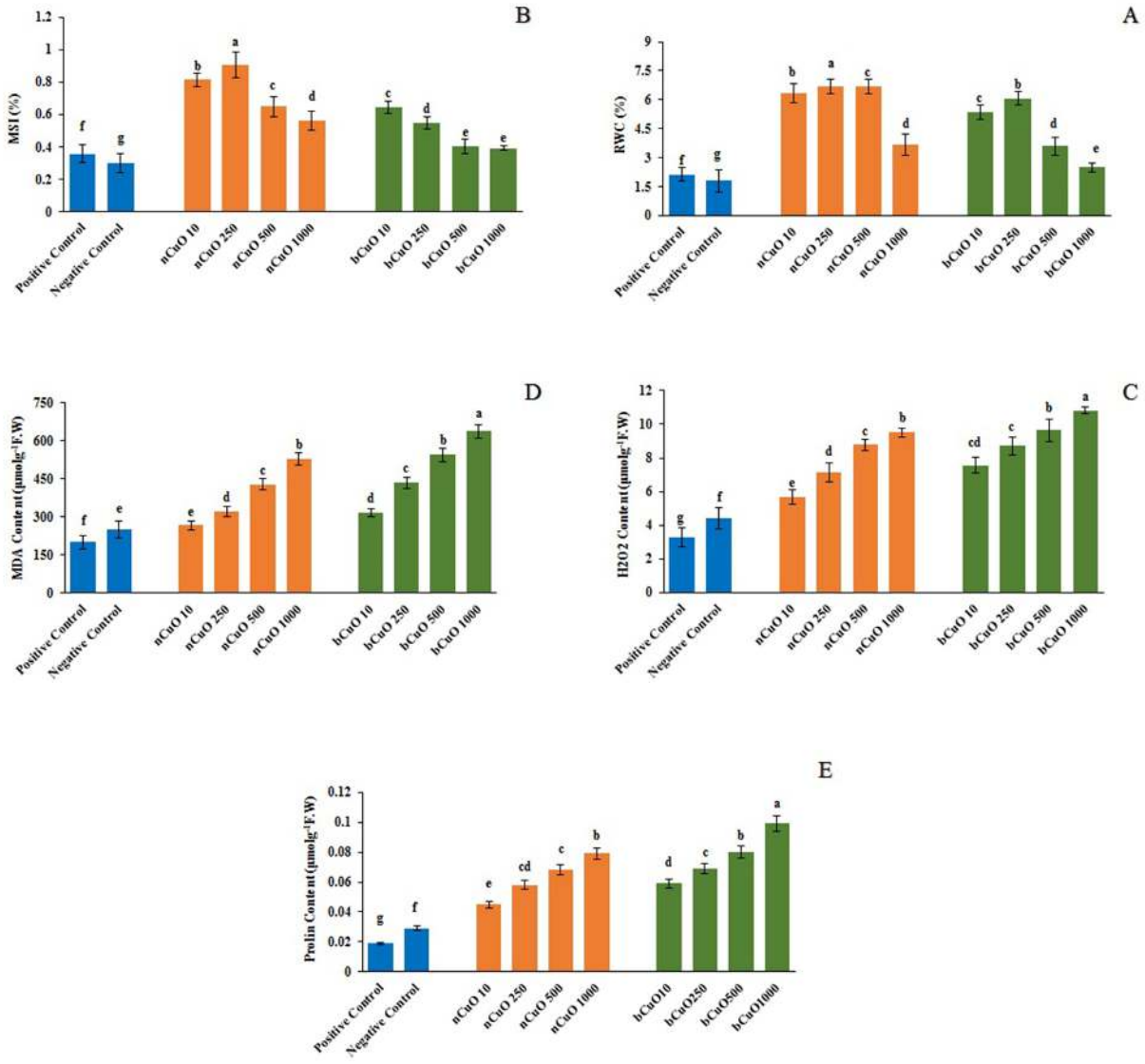
غلظت پرولین: همانطور که در شکل ۳E مشخص است غلظت پرولین گیاهان تیمار یافته با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر ذرات نانو وفرم توده، به ترتیب با مقدار ۰/۰۹۹ ±۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۲۱ ± ۰/۰۷۹ میکرومول برگرم وزن‌تر، در بیشینه محتوا قرار گرفتند و بقیه تیمارها، موجب سطح کمتری از محتوای پرولین شدند. همچنین سطح پرولین نمونه کنترل منفی بیشتر از نمونه کنترل مثبت به ثبت رسید.

بحث

در علوم گیاهی، نانوذرات فلزی به دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود از جمله نسبت سطح به حجم زیاد، پایداری ساختاری و میل‌ترکیبی قوی به هدف، نقش مهمی در حفاظت از محصولات زراعی ایفا می‌کنند (Wu et al., 2021). در میان نانوذرات فلزی پیشرو، مس محبوب‌ترین و به‌عنوان تنها ماده ضدمیکروبی جامد ثبت شده است. به این ترتیب، این فلز پتانسیل زیادی برای استفاده به تنهایی، یا برای ادغام با قارچ‌کش‌های موجود و اقدامات کنترلی، برای بهبود عملکرد قارچ‌کش دارد (Oussou-Azo et al., 2020).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]



شکل ۳- مقایسه تأثیر تیمار با غلظت‌های مختلف نانوذرات مس‌اکسید (nCuO) و فرم توده‌ای آن (bCuO) بر محتوای نسبی‌آب برگ **(A)**، ضریب پایداری غشاء **(B)**، محتوای پراکسید هیدروژن **(C)**، محتوای مالون‌دی‌آلدئید **(D)** و محتوای پرولین **(E)** در مقایسه با نمونه‌های شاهد، در گندم رقم روشن. مقادیر میانگین سه تکرار ± SE است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر مبنای آزمون دانکن در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است. nCuO فرم نانوذرات و bCuO فرم توده‌ای ذرات است.

Figure 3. Comparison of the effect of different concentrations of copper oxide nanoparticles (nCuO) and the bulk form (bCuO) on the relative water content **(A)**, membrane stability index **(B)**, hydrogen peroxide content **(C)**, malondialdehyde content **(D)** and proline content **(E)** compared to the controls in wheat (Roshan cultivar). Each data is the mean of 3 independent replicates ± SE; values with the same letter did not significantly differ at $P \leq 0.05$ levels based on the Duncan test. nCuO is the nanoparticle form and bCuO is the bulk form of the particle.

نتایج مطالعات حاضر نشان می‌دهد که تمام اشکال مس‌اکسید (فرم نانو و توده) به صورت وابسته به غلظت موجب مهار رشد هیف قارچ فوزاریوم می‌شوند ولیکن تاثیر فرم نانو، به طور معنی-داری بیشتر از تاثیر فرم توده است. در مطالعات پیشین مشخص شده است که نانوذرات فلزی و اکسید فلزی این توانایی را دارند تا از عفونت پاتوژن‌های ویروسی، از جمله ویروس شلغم موزائیک (*Turnip Mosaic Virus*) در تنباکو (*Nicotiana benthamiana*) و ویروس (*Podosphaera pannosa*) در گل‌رز (*Rosa rugosa Thunb.*) جلوگیری کنند (Hao et al., 2018 and 2019). همچنین سرکوب موفقیت‌آمیز بیماری پژمردگی فوزاریوم ناشی از قارچ *F. oxysporum* توسط نانوذرات مس‌اکسید در هندوانه (*Citrullus lanatus*) تایید شد (Borgatta et al., 2018). در تحقیق Kazemian و همکاران (2019)، کاربرد نانوذرات مس‌اکسید سنتز شده موجب مهار قارچ

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

(*Botrytis cinerea*) در گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) شد. مشخص شده است که عنصر مس در مسیرهای دفاعی گیاه، به‌ویژه برای عملکرد ریشه‌ها در برابر پاتوژن‌های موجود در خاک، حیاتی هستند. طی مطالعات قبل، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نحوه‌ی برهم‌کنش نانوذرات با میکروارگانیسم‌ها را بررسی شده و بیان داشتند که با اتصال نانوذرات، تغییرات ساختمانی و آسیب جدی به سلول پاتوژن وارد می‌شود و به‌طورخاص، اعمال حیاتی سلول از جمله نفوذپذیری، فعالیت‌های متابولیکی نظیر آنزیم‌های چرخه تنفسی مختل می‌گردد و در نهایت مرگ سلول را به دنبال خواهد داشت (Chwalibog et al., 2010). یون مس جداشده از ساختار نانوذرات منجر به آسیب جدی به ماده وراثتی DNA می‌شود. نتایج بدست آمده از تاثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات مس‌اکسید نشان داد که غلظت‌های بیشتر این نانوذرات خاصیت قارچ‌کشی بیشتری در مقایسه با فرم توده‌ای آن دارد (Bondarenko et al., 2012).

با توجه به نتایج تحقیق حاضر، آلوده شدن گندم به قارچ فوزاریوم موجب کم شدن صفات رشد و پژمرده شدن گیاه شد که می‌تواند پیامد انسداد آوندهای چوبی توسط این قارچ باشد (Viet et al., 2016). درحالی‌که تیمار با غلظت‌های بهینه و میانه ذرات مس‌اکسید، به ویژه فرم نانو آن، موجبات افزایش پارامترهای رشدگیاه را فراهم نمود. در مطالعه ای، طول ریشه و ساقه نهال بادمجان (*Solanum melongena* L.) درنتیجه تیمار با غلظت کمتر CuO NPs (۱۰۰ میلی‌گرم درلیتر) در مقایسه با گیاهان شاهد افزایش یافت که می تواند مهر تاییدی بر محرک رشد بودن CuO NPs در غلظت‌های بهینه باشد (Baskar et al., 2018). افزایش معیارهای رشد گیاه ماش (*Vigna radiata* L.) در پاسخ به غلظت کم CuO NPs نیز گزارش شده است (Spanos et al., 2021). افزایش غلظت CuO NPs و CuO bulk نیز زمینه را برای کاهش طول ساقه و ریشه جو (*H. sativum*) فراهم نمود که علت به اثرات مخرب غلظت‌های بالای فرم CuO NPs و CuO bulk بر ساختار سلولی نسبت داده شد. در این پژوهش هم نیز همانند تحقیق پیش رو، تیمار با CuO NPs بهتر از تیمار با فرم CuO bulk و غلظت کم نسبت به غلظت بالا ترجیح داده شد (Rajput et al., 2020). علاوه بر این، گزارش که رشد گیاهان گندم اسپری پاشی شده با CuO NPs افزایش یافته است (Hossain et al., 2020). در مطالعه‌ای دریافتند که وزن‌تر و خشک گیاهان گشنیز (*Coriandrum sativum* L.)، هنگامی که در خاک اصلاح شده با ۸۰ میلی‌گرم برکیلوگرم CuO NPs رشد کردند، افزایش یافت (Zuverza-Mena et al., 2015). همچنین مشاهده شدکه خاک‌های اصلاح شده با CuO NPs (در غلظت‌های ۱۰ تا ۳۰ میلی‌گرم درلیتر) طور قابل‌توجهی رشد گندم را افزایش داد (Hafeez, 2015). به طور کلی و برمبنا نتایج گزارشات، افزایش غلظتCuO NPs موجب کاهش رشد گیاه می‌شود که علت آن را به افزایش تولید اتیلن و کاهش فعالیت و تولید سیتوکنین، پلی‌آمین‌ها و بازدارندگی گسترش رشد سلول ناشی از اثرات مستقیم و یا غیر مستقیم مس بر متابولیسم یا ساختمان اکسین نسبت می‌دهند (Coombes et al., 1976).

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ظرفیت فتوسنتزی هر گیاهی، محتوای کلروفیل‌ها و سایر رنگیزه‌های فتوسنتزی است که در تحقیق پیش رو، کاهش کلروفیل *a*، کلروفیل‌کل، ضریب پایداری کلروفیل و کارتنوئیدها (به غیر از کلروفیل *b*) در حضور آلودگی قارچی به ثبت رسید. همچنین غلظت‌های کم و میانه تیمار با دو فرم CuO NPs و CuO bulk موجب بهبود صفات مذکور در گندم بیمار شده شد؛ هرچند که میزان تاثیرات مثبت ناشی از فرم نانو ذرات بهتر از فرم توده ای آن بود. مشابه با نتایج حاضر، غلظت‌های کمتر CuO NPs، رنگیزه‌های برگ (کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها) گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) آلوده به قارچ *F. oxysporum* را افزایش داد. علاوه بر این، غلظت‌های پایین‌تر CuO NPs توانست میزان فتوسنتز گوجه‌فرنگی را تا ۱۴ درصد (در مقایسه با سطح شاهد) تحریک کند (Saharan et al., 2015). در پژوهشی نیز اسپری‌پاشی ذرات نانومس‌اکسید در غلظت کم (۲/۵ و ۵ میلی‌گرم درلیتر)، سبب افزایش محتوای کروفیل و کارتنوئید جلبک *Scenedesmus dimorphus* شد درحالی‌که نتیجه با غلظت‌های بالاتر نانوذرات مذکور (۱۰و ۲۰ میلی‌گرم درلیتر) برعکس بود (Kazemi et al., 2019). ثابت شده است که نانوذرات فلزی در غلظت‌های پایین می توانند ساختار کلروفیل را تقویت کرده و تشکیل رنگیزه‌ها و به دنبال آن، فعالیت‌های متابولیکی را تسهیل کنند. اما در نتیجه تنش حاصل از غلظت بالای نانوذرات فلزی (۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر پژوهش حاضر)، با توجه به افزایش تشکیل گونه‌های کنشگر اکسیژن (ROS) در کلروپلاست، میزان تخریب غشاهای کلروپلاستی نیز افزایش می‌یابد. کلروفیل *b* حساسیت بیشتری در برابر ROSها نشان می دهد و به دنبال تخریب غشاهای کلروپلاستی و تخریب کمپلکس پروتئینی Chl *a*/*b* محتوای کلروفیل *b* آزاد در غلظت های بالای فرم نانوذره و توده ای افزایش پیدا می‌کند. همچنین فتوسیستم II به جهت دارابودن تعداد کلروفیل *b* بیشتر، از حساسیت بیشتر به انواع تنش‌ها از جمله تنش اکسیداتیو برخوردار است. دلیل دیگر کاهش رنگیزه

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

های فتوسنتزی می‌تواند به دلیل بازدارندگی مراحل مختلف سنتز کلروفیل و رنگیزه‌های دیگر باشد. به‌نظرمی‌رسد که غلظت-های بالای نانوذرات فلزی (از جمله CuO NPs) با بازدارندگی در سطح رونویسی LHCII روند تشکیل این کمپلکس را مختل می‌سازند (Tzvetkova et al., 1996). در مورد کاروتنوئیدها و عملکرد آن‌ها، باید بیان داشت که تغییرات آن‌ها در حین انواع تنش می‌تواند راهی موثر در جهت حذف ROSها باشد (Swapnil et al., 2021). از این رو تغییرات افزایشی آن ها در زمان غلظت‌های میانه نانوذرات، امری طبیعی در جهت بالابردن سیستم دفاعی محسوب می‌گردد.

محتوای نسبی آب گندم‌های تیمارشده در مقایسه با نمونه‌های کنترل افزایش یافت ولیکن تیمار غلظت‌های بالا هر دو فرم CuO NPs و CuO bulk موجب کاهش آن شد. مشابه با این نتایج، مشخص شد که تیمار با غلظت ۲۵ میلی‌گرم درلیتر نانوذرات Fe_3O_4 NPs موجب افزایش محتوای نسبی آب گیاه بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) گردید درحالی‌که کمترین محتوای نسبی آب در گیاهان تیمار شده با ۱۰۰ میلی-گرم درلیتر نانوذرات به دست آمد (Rastegaran et al., 2022). پیشنهاد می‌گردد که در غلظت بالا CuO NPs و CuO bulk، یون مس آزادشده از ساختار هردو نوع ذرات در فضای سیتوپلاسم تجمع می‌یابد که ماحصل آن، ایجاد تنش فلزات برای گیاه است. درچنین حالتی گیاه برای سازگاری با شرایط تنش و حفظ بقا، با بستن روزنه‌های خود مانع خروج آب برگ و در نهایت کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Pourakbar et al.,2014).

هرچند تیمار با هردوفرم ذرات CuO NPs و CuO bulk موجب افزایش ضریب‌پایداری‌غشاء نسبت به نمونه‌های کنترل گندم رقم روشن گردید ولی در غلظت‌های بالا (۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر)، کاهش ضریب‌پایداری‌غشاء نسبت به غلظت-های کمتر تیمارها قابل‌توجه بود. مشابه با تحقیق حاضر، در غلظت‌های بالای نانوذرات CuO، ضریب‌پایداری‌غشاء گندم (Etesami et al., 2021)، پنبه (*Gossypium hirsutum*) و آرابیدوبسیس (*Arabidopsis thaliana*) به‌شدت کاهش یافت (Nair et al., 2014). در توجیه این مساله بیان شده است که افزایش غلظت یون مس آزاد شده از ساختار ذرات آزاده‌کننده مس، باعث تولید برخی ترکیبات‌کنشگراکسیژن ازجمله رادیکال-های سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود و در نهایت تمامیت غشای سلولی را تخریب می‌کنند و به‌طبع‌آن الکترولیت‌ها به بیرون از سلول تراوش کرده و این امر موجب افزایش بار منفی داخل سلول می‌گردد (Liang et al., 2009).

یکی از اولین واکنش‌های هر گیاه به عفونت پاتوژن، تولید انواع ROS در فرآیند انفجار اکسیداتیو است. طبق نتایج، با افزایش غلظت هر دو فرم نانوذرات و فرم توده CuO، افزایش محتوای پراکسیدهیدروژن در برگ گندم به ثبت رسید. به نظر می‌رسد در بین انواع مولکول‌های فعال اکسیژن تولید شده، اندازه‌گیری غلظت H_2O_2 نشانگر خوبی برای توانایی واکنش گیاه در برابر تنش و شدت آن باشد (Asaeda *et al.*, 2022). در مطالعه‌ای بر روی کتان (*Linum usitatissimum* L.)، سویا (*Glycine max* L.)، ذرت (*Z. mays*)، جو (*H. sativum*)، سطوح پراکسیدهیدروژن پس از تلقیح با قارچ‌های *F. culmorum* و *F. oxysporum* افزایش یافت (Galindo-González *et al.*, 2016). به علاوه قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بالا CuO NPs منجر به افزایش قابل توجهی در تشکیل پراکسیدهیدروژن سویا (*G. max*) و خردل (*Brassica juncea* L.) گردید (Faraz et al., 2018). در غلظت‌های بالای نانوذرات مس-اکسید، مس اضافی منپراکسید هیدروژن از طریق واکنش‌های هابر-وایس یا از طریق انتقال الکترون فتوسنتزی می‌شود. همچنین گزارش شده است که آسیب اکسیداتیو یکی از دلایل اصلی سمیت نانوذرات است (Husen et al., 2014). شواهد مطالعه حاضر نشان داد با روند افزایشی غلظت هر دو فرم CuO NPs و CuO bulk، محتوای مالون‌دی‌آلدئید گندم آلوده به قارچ افزایش یافت. قطعا این مساله با افزایش تولید پراکسیدهیدروژن و سایر انواع ROS ها مرتبط است که پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و آسیب به آن را در پی خواهد داشت. در مطالعه ای مشخص شد که در غلظت‌های بالا نانوذرات CuO، محتوای مالون‌دی‌آلدئید ریشه پیاز (*Allium cepa* L.) نیز به طور معنی داری افزایش می‌یابد. همبستگی مثبت بین محتوای مالون‌دی-آلدئید با غلظت CuO NPs تیمارشده در مطرح شد که نشان دهنده دست دادن بیشتر یکپارچگی غشاء سلول ناشی از قرارگرفتن در معرض Cu^2 در مقایسه با CuO NPs بود (Dai et al., 2018).

در بسیاری از گیاهان، پرولین آزاد در پاسخ به تحمل طیف-وسیعی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی تجمع یافته و یا به گیاه برای دفاع در برابر پاتوژن کمک می‌کند (Yaish, 2015). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که گیاهان در حضور قارچ و بدنبال آن، تیمار با هر دو فرم CuO NPs و CuO bulk تجمع زیاد پرولین را بروز می‌دهند. براساس نتایج پیشین تولید پرولین در گیاهان تیمار یافته با هرکدام از فرم نانو و توده، به صورت گرادیان

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

وابسته به غلظت افزایش می یابد. این افزایش غلظت پرولین تحت تنش غلظت‌های بالای نانوذرات فلزی یکی از سازوکارهای حفظ پتانسیل اسمزی گیاه است که می تواند در گونه‌های مختلف گیاهان متفاوت باشد (Kumari et al., 2022). افزایش تجمع پرولین در ریشه گیاهان در معرض قارچ و ذرات مس اکسید ممکن است مکانیسم دفاعی گیاهان برای محافظت از ساختارهای سلولی در برابر آسیب ناشی از تولید بیش از حد ROS ناشی از غلظت‌های بالای ذرات CuO NPs وCuO bulk باشد که به‌طبع‌آن با پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی مرتبط است (Yu et al., 2020).

نتیجه‌گیری

به طورکلی استفاده از نانوذرات CuO (در غلظت‌های بهینه و کم) در مقایسه با فرم توده‌ای آن سبب مهار بیشتر بیماری قارچ *F. calmorum* و افزایش شاخص رشد و صفات بیوشیمیایی در گندم رقم روشن شد. بنابراین، با توجه به افزایش سرعت علم نانوتکنولوژی و اثرات گسترده آن در زمینه‌های مختلف از جمله توانایی مهار و کنترل قارچ و بیماری‌های قارچی احتمالا می‌توان تا حد بسیار زیادی از این ویژگی در جهت کنترل خسارت‌های قارچ بر غلات و به‌ویژه گندم بهره برد.

سپاسگزاری

نگارندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد بابت تأمین هزینه‌های پژوهش حاضر از محل اعتبارات متمرکز این معاونت (با کد طرح به شماره ۳/۵۳۰۰۶) قدردانی می نمایند.

REFERENES

Arnon, D.I., Tsujimoto, H.Y. & McSwain, B.D. 1967. Ferredoxin and photosynthetic phosphorylation. Nature, 214: 562-566.

Asadi, M., Zahedi, M., Ehtemam, M. & Khoshgoftarmanesh, A. 2013. The effect of zinc oxide application as nanoparticles on growth and content of four wheat cultivars under saline stress. Journal Cultural Science and Technology 25: 25-35.

Asaeda, T., Rahman, M. & Abeynayaka, H.D.L. 2022. Hydrogen peroxide can be a plausible biomarker in cyanobacterial bloom treatment. Scientific Reports 12: 1-11.

Ashkavand, P., Tabari Koocksra, M. & Zarafshar, M. 2015. Some applications of nanoparticles in plant science. Journal of Food Science and Agriculture 125: 65-73.

Azizpour, K., Shakiba, M.R., Khosh Kholgh Sima, N., Alyari, H., Moghaddam, M., Esfandiari, E. & Pessarakli, M. 2010. Physiological response of spring durum wheat genotypes to salinity. Journal of Plant Nutrition 33: 859-873. (In Persian).

Badawy, A.A., Abdelfattah, N.A., Salem, S.S., Awad, M.F. & Fouda, A. 2021. Efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphological and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. Biology 10: 233. DOI: 10.3390/biology10030233.

Baskar, V., Nayeem, S., Kuppuraj, S.P., Muthu, T. & Ramalingam, S. 2018. Assessment of the effects of metal oxide nanoparticles on the growth, physiology and metabolic responses in in vitro grown eggplant (*Solanum melongena*). Biotech 8: 1-12.

Bates, L. S., Waldren, R.P. & Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.

Bondarenko, O., Ivask, A., Käkinen, A. & Kahru, A. 2012. Sub-toxic effects of CuO nanoparticles on bacteria: kinetics, role of Cu ions and possible mechanisms of action. Environmental Pollution 169: 81-89.

Borgatta, J., Ma, C., Hudson-Smith, N., Elmer, W., Plaza Perez, C.D., De La Torre-Roche, R., Zuverza-Mena, N., Haynes, C., White, J. & Hamers, R.J. 2018. Copper based nanomaterials suppress root fungal disease in watermelon (*Citrullus lanatus*): role of particle morphology, composition and dissolution behavior. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 6: 14847-14856.

Boukaya, N., Goudjal, Y., Zamoum, M., Chaabane Chaouch, F., Sabaou, N., Mathieu, F. & Zitouni, A. 2018. Biocontrol and plant-growth-promoting capacities of actinobacterial strains from the Algerian Sahara and characterization of *Streptosporangium becharense* SG1 as a promising biocontrol agent. Biocontrol Science and Technology 28: 858-873.

Chalandar, H.E., Ghorbani, H.R., Attar, H. & Alavi, S.A. 2017. Antifungal effect of copper and copper oxide nanoparticles against Penicillium on orange fruit. Biosciences Biotechnology Research Asia 14: 279-284.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

Chwalibog, A., Sawosz, E., Hotowy, A., Szeliga, J., Mitura, S., Mitura, K., Grodzik, M., Orlowski, P. & Sokolowska, A. 2010. Visualization of interaction between inorganic nanoparticles and bacteria or fungi. International Journal of Nanomedicine 5: 1085. DOI: 10.2147/IJN.S13532.

Coombes, A.J., Lep, N.W. & Phipps, D.A. 1976. Effect of copper on IAA oxidase activity in root tissue of barley (*Hordeum vulgare*. c. v. zephyr). Plant Physiology 55: 236-242.

Dai, Y., Wang, Z., Zhao, J., Xu, L., Xu, L., Yu, X., Wei, Y. & Xing, B. 2018. Interaction of CuO nanoparticles with plant cells: internalization, oxidative stress, electron transport chain disruption, and toxicogenomic responses. Environmental Science: Nano 5: 2269-2281.

Dehghanpour-Farashah, S., Taheri, P. & Falahati-Rastegar, M. 2019. Effect of polyamines and nitric oxide in *Piriformospora indica*-induced resistance and basal immunity of wheat against *Fusarium pseudograminearum*. Biological Control 136: 104006. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2019.104006.

Desai, S., Dubey, S.C. & Prasad, R.D. 2020. Impacts of climate change on Fusarium species vis-à-vis adaptation strategies. Indian Phytopathology 73: 593-603.

Dignam, B.E., Marshall, S.D., Wall, A.J., Mtandavari, Y.F., Gerard, E.M., Hicks, E., Cameron, C., Aalders, L.T., Shi, S. & Bell, N.L. 2022. Impacts of soil-borne disease on plant yield and farm profit in dairying soils. Journal of Sustainable Agriculture and Environment 1: 16-29.

El Shafey, A.M. 2020. Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles from plant leaf extracts and their applications: A review. Green Processing and Synthesis 9: 304-339.

Etesami, H., Fatemi, H. & Rizwan, M. 2021. Interactions of nanoparticles and salinity stress at physiological, biochemical and molecular levels in plants: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety 225: 112769. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112769.

Faraz, A., Faizan, M., Hayat, S. & Alam, P. 2022. Foliar Application of Copper Oxide Nanoparticles Increases the Photosynthetic Efficiency and Antioxidant Activity in *Brassica juncea*. Journal of Food Quality 2022. DOI: 10.1155/2022/5535100.

Galindo-González, L. & Deyholos, M.K. 2016. RNA-seq Transcriptome Response of Flax (*Linum usitatissimum* L.) to the Pathogenic Fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. lini. Frontiers in Plant Science 7: 1766. DOI: 10.3389/fpls.2016.01766.

Ganjeali, V., Cheniany, M., Taheri, P. & Mazaheri-Tirani, M. 2022. Evaluation of treatment of copper oxide nanoparticles on inhibition of Fusarium culmorum in wheat. 22nd national and 10th international congress on Biology. Shahrekord, Iran.

Ghahremaninejad, F., Hoseini, E. & Jalali, S. 2021. The cultivation and domestication of wheat and barley in Iran, brief review of a long history. The Botanical Review 87: 1-22.

Hafeez, A., Razzaq, A., Mahmood, T. & Jhanzab, H.M. 2015. Potential of copper nanoparticles to increase growth and yield of wheat. Polymers for Advanced Technologies 1: 6-11.

Hao, Y., Fang, P., Ma, C., White, J.C., Xiang, Z., Wang, H., Zhang, Zh., Rui, Y. & Xing, B. 2019. Engineered nanomaterials inhibit Podosphaera pannosa infection on rose leaves by regulating phytohormones. Environmental Research 170: 1-6.

Hao, Y., Yuan, W., Ma, C., White, J. C., Zhang, Z., Adeel, M., Zhou, T., Rui, Y. & Xing, B. 2018. Engineered nanomaterials suppress Turnip mosaic virus infection in tobacco (*Nicotiana benthamiana*). Environmental Science: Nano 5: 1685-1693.

Health, RL. & Packer, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics125: 189-198.

Hossain, Z., Yasmeen, F. & Komatsu, S. 2020. Nanoparticles: synthesis, morphophysiological effects, and proteomic responses of crop plants. International Journal of Molecular Sciences 21: 3056. DOI: 10.3390/ijms21093056.

Hsiao, M.T., Chen, S.F., Shieh, D.B. & Yeh, C.S. 2006. One-pot synthesis of hollow Au3Cu1 spherical-like and biomineral botallackite Cu2 (OH) 3Cl flowerlike architectures exhibiting antimicrobial activity. The Journal of Physical Chemistry B 110: 205-210.

Husen, A. & Siddiqi, K. S. 2014. Photosynthesis of nanoparticles: concept, controversy and application. Nanoscale Research Letters 9: 1-24.

Ibrahim, A.S., Ali, G.A., Hassanein, A., Attia, A.M. & Marzouk, E.R. 2022. Toxicity and uptake of CuO nanoparticles: Evaluation of an emerging nanofertilizer on wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Sustainability 14: 4914. DOI: 10.3390/su14094914.

Kazemi, M. & Shariati, F. 2019. The effect of Copper Oxide nanoparticle on pigments systems of algae *Scenedesmus dimorphus*. Biological Journal of Microorganism 8: 13-25.

Kazemian, S., Zarrinnia, V., Khosroshahli, M. & Hasanzadeh, N. 2019. Investigation on the control effects of green copper oxide (CuO) nanoparticles on the tomato gray mold disease caused by *Botrytis cinerea*. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants 35: 54-67. (In Persian)

Ksieniewicz-Woźniak, E., Bryła, M., Michałowska, D., Waśkiewicz, A. & Yoshinari, T. 2021. Transformation of Selected Fusarium Toxins and Their Masked Forms during Malting of Various Cultivars of Wheat. Toxins 13: 866. DOI: 10.3390/toxins13120866.

Kumar, P., Yadava, R.K., Gollen, B., Kumar, S., Verma, R.K. & Yadav, S. 2011. Nutritional contents and medicinal properties of wheat: a review. Life Sciences and Medicine Research 22: 1-10.

Kumari, K., Warepam, M., Bansal, A.K., Dar, T. A., Uversky, V.N. & Singh, L.R. 2022. The gut metabolite, trimethylamine N-oxide inhibits protein folding by affecting cis–trans isomerization and induces cell cycle arrest. Cellular and Molecular Life Sciences 79: 1-16.

Liang, G., Pu, Y., Yin, L., Liu, R., Ye, B., Su, Y. & Li, Y. 2009. Influence of different sizes of titanium

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

dioxide nanoparticles on hepatic and renal functions in rats with correlation to oxidative stress. Journal of Toxicology and Environmental Health 72: 740-745.

Ma, C., Borgatta, J., De La Torre-Roche, R., Zuverza-Mena, N., White, J.C., Hamers, R.J. & Elmer, W.H. 2019. Time-dependent transcriptional response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to Cu nanoparticle exposure upon infection with *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 7: 10064-10074.

Nair, P.M.G. & Chung, I.M. 2014. Assessment of silver nanoparticle-induced physiological and molecular changes in Arabidopsis thaliana. Environmental Science and Pollution Research 21: 8858-8869.

Oussou-Azo, A.F., Nakama, T., Nakamura, M., Futagami, T. & Vestergaard, M.D.C.M. 2020. Antifungal potential of nanostructured crystalline copper and its oxide forms. Nanomaterials 10: 1003. DOI: 10.3390/nano10051003.

Pariona, N., Paraguay-Delgado, F., Basurto-Cereceda, S., Morales-Mendoza, J. E., Hermida-Montero, L. A. & Mtz-Enriquez, A.I. 2020. Shape-dependent antifungal activity of ZnO particles against phytopathogenic fungi. Applied Nanoscience 10: 435-443.

Parry, D.W., Jenkinson, P. & McLeod, L. 1995. Fusarium ear blight (scab) in small grains-a review. Plant Pathology 44: 207-238.

Pellan, L., Durand, N., Martinez, V., Fontana, A., Schorr-Galindo, S. & Strub, C. 2020. Commercial biocontrol agents reveal contrasting comportments against two mycotoxigenic fungi in cereals: *Fusarium graminearum and Fusarium verticillioides*. Toxins 12: 152. DOI: 10.3390/toxins12030152.

Pourakbar, L. & Ebrahimzade, N. 2014. Growth and physiological responses of *Zea mays* L. to Cu and Ni stress. Applied Field Crops Research 27: 147-159.

Rajput, V., Minkina, T., Sushkova, S., Behal, A., Maksimov, A., Blicharska, E., Ghazaryan, K., Movsesyan, H. & Barsova, N. 2020. ZnO and CuO nanoparticles: a threat to soil organisms, plants, and human health. Environmental Geochemistry and Health 42: 147-158.

Rastegaran, M. M., Hassanpour, H. & Ziyadi, H. 2022. Synthesized Fe3O4 nanoparticles induced antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content in *Matricaria chamomilla* seedlings. Iranian Journal of Plant Physiology 12: 4003-4011.

Saharan, V., Sharma, G., Yadav, M., Choudhary, M.K., Sharma, S.S., Pal, A., Raliya, R., Biswas, P. & Biswas, P. 2015. Synthesis and in vitro antifungal efficacy of Cu–chitosan nanoparticles against pathogenic fungi of tomato. International Journal of Biological Macromolecules 75: 346-353.

Scherm, B., Balmas, V., Spanu, F., Pani, G., Delogu, G., Pasquali, M. & Miqheli, Q. 2013. *Fusarium culmorum*: causal agent of foot and root rot and head blight on wheat. Molecular Plant Pathology 14: 323-341.

Smart, R.E. & Bingham, G.E. 1974. Rapid estimates of relative water content. Plant Physiology 53: 258-260.

Soltani, E., Rajabian, T., Abrishamchi, P. & Tali, D. 2016. Physiological and biochemical responses of (*Melissa officinalis*) to nickel stress and the protective role of salicylic acid. Archives of Agronomy and Soil Science 63: 330-343.

Spanos, A., Athanasiou, K., Ioannou, A., Fotopoulos, V. & Krasia-Christoforou, T. 2021. Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications. Nanomaterials. 11: 3106. DOI: 10.3390/nano11113106.

Swapnil, P., Meena, M., Singh, S.K., Dhuldhaj, U. P. & Marwal, A. 2021. Vital roles of carotenoids in plants and humans to deteriorate stress with its structure, biosynthesis, metabolic engineering and functional aspects. Current Plant Biology 26: 100203. DOI: 10.1016/j.cpb.2021.100203.

Terzi, R. & Kadioglu, A. 2006. Drought stress tolerance and the antioxidant enzyme system. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica 48: 89-96.

Tiwari, S.K., Sahoo, S., Wang, N. & Huczko, A. 2020. Graphene research and their outputs: Status and prospect. Journal of Science: Advanced Materials and Devices 5: 10-29.

Tzvetkova, N. & Kolarov, D. 1996. Effect of air pollutionon carbohydrate and nutrients concentrations in some deciduous tree species, Bulg. Journal of Plant Physiology 22: 53-63.

Velikova, V., Yordanov, I. & Edreva, A. 2000 Oxidative stress and some antioxidant systems in acid Rain-treated bean plants: Protective role of exogenous poly-amines. Plant Science 151: 59-66.

Viet, P.V., Nguyen, H.T., Cao, T.M. & Hieu, L.V. 2016. Fusarium antifungal activities of copper nanoparticles synthesized by a chemical reduction method. Journal of Nanomaterials 2016. DOI: 10.1155/2016/1957612 .

Wagacha, J.M. & Muthomi, J.W. 2007. *Fusarium culmorum*: Infection process, mechanisms of mycotoxin production and their role in pathogenesis in wheat. Crop Protection 26: 877-885.

Winter, R.S., Yan, J., Busche, C., Mathieson, J.S., Prescimone, A., Brechin, E. K., Long, D.L. & Cronin, L. 2013. Nanoscale control of polyoxometalate assembly: a {Mn8W4} cluster within a {W36Si4Mn10} cluster showing a new type of isomerism. Chemistry–A European Journal 19: 2976-2981.

Wu, Z.P., Caracciolo, D.T., Maswadeh, Y., Wen, J., Kong, Z., Shan, S., Hopkins, E., Park, K., Sharma, A., Ren, Y., Petkov, V., Wang, L. & Zhong, C.J. 2021. Alloying–realloying enabled high durability for Pt–Pd-3d-transition metal nanoparticle fuel cell catalysts. Nature Communications 12: 1-14.

Yu, Z., Li, Q., Wang, J., Yu, Y., Wang, Y., Zhou, Q. & Li, P. 2020. Reactive oxygen species-related nanoparticle toxicity in the biomedical field. Nanoscale Research Letters 15: 1-14.

Zakharova, O., Kolesnikov, E., Shatrova, N. & Gusev, A. 2019. The effects of CuO nanoparticles on wheat seeds and seedlings and *Alternaria solani* fungi: in vitro study. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 226: 012036.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]

Zuverza-Mena, N., Medina-Velo, I.A., Barrios, A.C., Tan, W., Peralta-Videa, J.R. & Gardea-Torresdey, J.L. 2015. Copper nanoparticles/compounds impact agronomic and physiological parameters in cilantro (*Coriandrum sativum*). Environmental Science: Processes & Impacts 17: 1783-1793.

*****

How to cite this article:

Ganjeali, V., Cheniany, M., Taheri, P., Mazaheri-Tirani, M. 2022. Evaluation of antifungal activity of nano and bulk forms of copper oxide in wheat (Roshan cultivar). Nova Biologica Reperta 10: 33-46. (In Persian).

گنجعلی، و.، چنیانی، م.، طاهری، پ.، مظاهری تیرانی، م. ۱۴۰۲. ارزیابی فعالیت ضدقارچی فرم‌های نانو و توده‌ای مس‌اکسید در رقم روشن گندم. یافته‌های نوین در علوم زیستی ۱۰: ۴۶-۳۳.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24236330.1402.10.1.4.7]