مقاله پژوهشی

بررسی اثر پرایمینگ بذر با کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانوذرات Fe_3O_4 حاصل از تجزیه حرارتی آن بر برخی شاخص‌های رشد و فیزیولوژیکی گیاه گندم

طاهره جهان‌تیغ[۱]، صدیقه اسمعیل‌زاده بهابادی[۱*]، زهره رزم‌آرا[۲] و سیده پریسا حسنین[۱]

[۱] گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل، ایران

[۲] گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل، ایران

(تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۱۱/۲۵، تاریخ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۳/۳۱)

چکیده

گندم یکی از مهمترین غلات پرمصرف است و با توجه به نقش نانوتکنولوژی در تولید محصولات زراعی، بررسی تأثیر نانوذرات بر فرآیندهای رشدی آن بسیار حائز اهمیت است. هدف پژوهش حاضر، تأثیر کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانو ذرات Fe_3O_4 حاصل از آن بر برخی شاخص‌های رشد و فیزیولوژیک گیاه گندم بود. در این تحقیق تیمارها شامل بدون پرایمینگ بذر (شاهد)، پرایمینگ با غلظت‌های مختلف (۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ppm) کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن حاصل از آن بود.کمپلکس آهن توسط آنالیز عنصری، طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) و طیف‌سنجی پراش اشعه X تک بلور (SC-XRD) تأیید ساختار شد. همچنین ساختار نانو ذرات Fe_3O_4 توسط طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR)، پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. میزان ترکیبات فنول کل با روش فولین سیوکاتیو، میزان ترکیبات فلاونوئیدی با استفاده از روش رنگ‌سنجی آلومینیم کلرید و میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان به روش FRAP اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که نانو ذرات اکسید آهن تهیه شده دارای اندازه ذرات کوچکتر و مساحت سطح ویژه بزرگتری نسبت به نانو کمپلکس آهن است. نتایج نشان داد که همه غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن باعث افزایش معنی‌دار شاخص‌های رشد و فیزیولوژیک نسبت به شاهد شدند. به‌طوری‌که بیشترین جوانه‌زنی بذر (۹۴٪) در غلظت ppm ۵۰۰ نانوذرات آهن مشاهده شد. بیشترین طول ریشه‌چه (۲۷ cm)، طول ساقه‌چه (۱۶/۳ cm)، وزن خشک ساقه‌چه (۱/۷ mg)، وزن خشک ریشه‌چه (۱/۲ mg)، وزن خشک ریشه (۰/۰۳ g)، وزن خشک ساقه (۰/۰۴ g)، طول ریشه (۲۹/۳۳ cm) و طول ساقه (۲۹ cm) در غلظت ppm ۵۰۰ نانوذرات آهن مشاهده شد. بیشترین محتوای فنول، محتوای فلاونوئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز در غلظت ppm ۵۰۰ نانوذرات آهن به‌دست آمد. براساس نتایج این تحقیق، پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن به‌عنوان محرکی مناسب جهت افزایش رشد و تولید ترکیبات فنولی در گیاه گندم پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: کمپلکس آهن، نانو ذرات آهن، شاخص‌های فیزیولوژیک، گیاه گندم

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) سومین غلات پرمصرف در جهان استکه به‌دلیل اهمیت آن به‌عنوان منبع اصلی فیبر رژیم

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: esmaeilzadeh@uoz.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

غذایی انسان، به‌عنوان یک محصول مدل کشاورزی استفاده می‌شود (Zhao *et al*., 2014). امروزه، نانوفناوری به‌عنوان یکی از روش‌های نویدبخش برای افزایش قابل توجه تولید غذای مورد نیاز جمعیت در حال رشد جهان است (Lal, 2008). امروزه استفاده از نانوذرات و نانوساختارها به علمی نوین تبدیل شده و توانسته تمام عرصه‌های علمی بشر را دگرگون سازد به‌طوری‌که فناوری نانو به‌طور گسترده در علوم مختلف از جمله بیوتکنولوژی و علوم کشاورزی گسترش یافته است (Das *et al*., 2004; Nair *et al*., 2010). نانو مواد شامل ذرات بین ۱ –۱۰۰ نانومتر هستند که که ویژگی و اثرات آنها علاوه بر ترکیب شیمیایی، تحت تأثیر اندازه آنها نیز است (Ma *et al*., 2010).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو در کشاورزی، استفاده از نانوذرات جهت تغذیه گیاهان و جذب مواد مغذی توسط گیاهان و افزایش سرعت فتوسنتز است (Salem and Elsheery, 2020; DeRosa *et al*., 2010). با استفاده از نانوذرات، عناصر غذایی به‌آرامی و با سرعتی مناسب در تمام فصل رشد گیاه آزاد می‌شوند و به‌دلیل کاهش آبشویی عناصر، گیاهان قادر به جذب بیشتر عناصر خواهند بود و آلودگی‌های زیست محیطی کاهش می‌یابد (Mastronardi *et al*., 2015; Liu and Lal, 2015). ترشحات ریشه‌ای تراوش شده در پاسخ به جذب نانو ذرات فلزی توسط گیاه نیز از مکانیسم‌های احتمالی در سهولت دسترسی عناصر غذایی در خاک است (Peralta-Videa *et al*., 2015).آهن یک عنصر کم‌مصرف مغذی و ضروری برای رشد گیاهان است که در متابولیسم گیاهان نقش مهمی را ایفا می‌کند(Hochmuth, 2011; Wang and Cai, 2010).

نانو ذرات آهن، از جمله نانوذراتی است که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. اثرات مثبت و منفی نانو ذرات بر رشد و متابولیسم گیاهان گزارش شده است که نوع پاسخ گیاه به ترکیب، غلظت، سایز و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات و هم‌چنین گونه گیاهی بستگی دارد (Siddiqui *et al*., 2015).

در پژوهشی محلول‌پاشی با نانو کود آهن موجب افزایش عملکرد و میزان آهن در قسمت‌های مختلف سویا و سورگوم شده است (Johnson *et al*., 2015). کاربرد نانو کودهای کلات آهن در اسفناج غلظت ترکیبات نامطلوب مانند نیترات و نیتریت سدیم را کاهش دادند (Peralta-Videa *et al*., 2015). Kornarzynski و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر نانوذرات Fe_3O_4 بر جوانه‌زنی بذرها و غلظت عناصر موجود در آفتابگردان را نشان دادند. در زمینه مطالعه نانوذرات آهن بر گندم نیز می‌توان به تحقیق فتحی و زاهدی (۱۳۹۳) در دو رقم گندم اشاره نمود که نشان دادند، محلول‌پاشی نانوذرات اکسید آهن و روی نسبت به فرم معمول آنها باعث افزایش بیشتر غلظت آهن و روی در گیاه شد. در تحقیق عبدالهی و همکاران (۱۳۹۷) نانو ذرات اکسید آهن کربوکسیل دار بیشترین تأثیر را بر غلظت و جذب روی در گندم داشتند. مظاهری‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی کارایی نانو اکسید آهن و اکسید معمولی آهن در جذب و غلظت عناصر غذایی در گندم گزارش کردند که نانو اکسید آهن نسبت به اکسید آهن معمولی برتری معنی‌داری داشت. در آزمایشی نانو ذرات اکسید آهن محلول‌پاشی شده باعث افزایش ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی (فنول، فلاونوئید و آنتی‌اکسیدانی) گیاه گندم شد (Ghafari and Razmjoo, 2013).

بررسی‌های Amiry Hosinkhani و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک گندم، از محلول‌پاشی آهن در زمان طویل‌شدن ساقه، حاصل شد. Armin و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف نانو کلات آهن بر صفات گندم، گزارش دادند که کاربرد غلظت ۴ درصد آهن، بالاترین عملکرد دانه را تولید کرد. در آزمایش Harsini و همکاران (۲۰۱۴) محلول‌پاشی کود نانو کلات آهن باعث افزایش ارتفاع چهار رقم گندم شد. براساس نتایج Lannone و همکاران (۲۰۱۶) فعالیت‌های آنزیم آنتی‌اکسیدانی گیاهان تیمار شده با نانوذرات آهن به‌طور معنی‌داری از نظر ریشه و قسمت هوایی نسبت به گروه شاهد افزایش یافت و پاسخی را برای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

جلوگیری از آسیب اکسیداتیو نشان داد. با توجه به گستردگی مناطق زیر کشت گندم، مواجه‌شدن بخشی از دوران رشد این گیاه با کمبود عناصر ریزمغذی آهن در بیشتر خاک‌ها، تعدیل بخشی از آثار این کمبودها با نانو ذرات آهن و بررسی‌های محدود انجام‌شده درباره تأثیر نانو ذرات آهن، در بررسی حاضر برای اولین بار تأثیر کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانو ذرات Fe_3O_4 حاصل از تجزیه حرارتی آن بر برخی شاخص‌های رشد و فیزیولوژیک گیاه گندم ارزیابی شد. مطالعات نشان می‌دهد که نانو ذرات حاصل از تجزیه حرارتی کمپلکس‌های معدنی به‌دلیل دارابودن سطح ویژه بالا و یکنواخت، کوچک‌بودن اندازه ذرات، مقادیر بسیار دقیق از فاز فعال و برهمکنش بین مراکز فلزی، فعال‌تر و پایدارتر از نانو ذرات کمپلکس آهن هستند (Saheli *et al.*, 2018). بنابراین اهداف این مطالعه عبارتند از ۱- تهیه کمپلکس نانو ساختار $[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$ توسط امواج التراسونیک و بررسی عملکرد آن بر شاخص‌های رشد و فیزیولوژیکی گیاه گندم۲- تهیه نانوذرات Fe_3O_4 حاصل از تجزیه حرارتی کمپلکس فوق و مقایسه عملکرد آنبا کمپلکس آهن.

مواد و روش ها

تهیه کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید آهن: تمامی مواد مورد استفاده در این پژوهش از شرکت‌های آلدریچ خریداری-شده و بدون خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای شناسایی و مطالعه خواص فیزیکی و شیمیایی کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید آهن حاصل از دستگاه‌ها و روش‌های مختلفی استفاده شد. آنالیز عنصری CHN توسط دستگاه Perkin-Elmer 2400 انجام شد. طیف‌های زیر قرمز توسط دستگاه طیف‌سنجی Jasco FT/IR-430 به‌صورت قرص KBr در محدوده فرکانسی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} گرفته شد. برای مطالعه ساختار بلوری کمپلکس آهن از داده‌های پراش پرتو ایکس تک بلور بدست آمده ازپراش سنج four-circle KUMA KM4 استفاده شد. الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات آهن توسط دستگاه Philips X-Pert MPD و با استفاده از تابش Cu-Kα و مونوکروماتور گرافیتی در طول‌موج Å ۱/۵۴۱۸۴ ثبت شد. تصاویر SEM جهت بررسی مورفولوژی کاتالیست‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه VEGA\\TESCAN-XMU گرفته شد. ساختارکمپلکس آهن با استفاده ازنرم‌افزارم رکوری رسم شده است واز نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس تک بلور استفاده شده است.

کمپلکس آهن $[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$ توسط امواج التراسونیک سنتزگردیدو دو بخش آنیونی و کاتیونی تشکیل شده است. برای سنتز کمپلکس کاتیونی با فرمول $[Fe(bpy)_3]^{2+}$ ابتدا ۳ میلی‌مول لیگاند 2,2-bipyridine معادل ۰/۴۶ گرم به ۲۰ میلی‌لیتر محلول اتانولی حاوی ۰/۱۹ گرم از نمک $FeCl_2.6H_2O$ تحت گاز نیتروژن اضافه شد و محلول حاصل به‌مدت ده دقیقه تحت امواج التراسونیک قرار گرفت. به‌طور همزمان در بشر دیگری بخش آنیونی با فرمول $[Fe(dipic)_2]$ تهیه شد. جهت تهیه بخش آنیونی مقدار ۰/۶۶ گرم از لیگاند پیریدین ۲،۶- دی کربوکسیلیک اسید در ۱۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر حل شد، به این محلول، مقدار ۰/۱۶ گرم سود حل‌شده در ۱۰ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر اضافه شد. به محلول حاصل مقدار ۰/۳۸ گرم نمک $FeCl_2.6H_2O$ اضافه شد و محلول حاصل در دمای اتاق به‌مدت ده دقیقه تحت امواج التراسونیک قرار گرفت. در ادامه کمپلکس کاتیونی به آرامی و تحت امواج التراسونیک به کمپلکس آنیونی اضافه شد. محلول حاصل صاف و در دمای اتاق تبخیر شد و پس از چند روز کریستال‌های کمپلکس $[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$ با بازده ۶۸ درصد تشکیل شد.

تهیه نانو ذرات اکسید آهن: جهت تهیه نانو ذرات Fe_3O_4، مقدار ۱۰ گرم از کمپلکس آهن $[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$ به‌مدت ۶ ساعت در یک کوره الکتریکی مخصوص کلسیناسیون در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و سپس نانو ذرات اکسید حاصل گردید (Saheli *et al.*, 2018).

بررسی شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد: کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن روی شاخص‌های رشد و جوانه‌زنی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

گیاه گندم بررسی گردید. به این صورت که بذرهای گندم، ۲۴ ساعت در محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰۰،۲۰۰ و ۵۰۰ ppm کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن به‌طور جداگانه خیسانده شد. پس از آن، بذرهای خیس‌شده در محلول‌های کمپلکس آهن و نانوذرات، به پتری‌دیش‌های استریل‌شده حاوی کاغذ صافی انتقال داده شدند و بذرهای کنترل‌شده در دستگاه انکوباتور برای جوانه‌زدن در تاریکی در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد در طی هفت روز قرار داده شدند، سپس هر روز تعداد بذرهای جوانه‌زده شمارش گردید شاخص جوانه‌زنی بذر از مجموع نسبت تعداد کل بذرهای جوانه‌زده به تعداد روزهای پس از کشت به‌دست آمد که در آن Ni برابر است با تعداد کل بذرهای جوانه‌زده تا روز Nام و Ti شماره روز که برای گندم اولین روز شمارش روز سوم و آخرین روز شمارش روز هشتم بود (Tekronyet *al*., 2000).

$$\sum G \cdot I = \frac{Ni}{Ti}$$

سرعت جوانه‌زنی بذرها با استفاده از روش ماگوئر (Maguire) محاسبه شد که برابر با مجموع نسبت $\frac{Ni}{Ti}$ است که در آن Ni تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز و Ti تعداد روزهای پس از کشت به‌دست آمد.

$$\sum G \cdot R = \frac{Ni}{Ti}$$

پس از پایان جوانه‌زنی بذرها از هر پتری‌دیش سه جوانه انتخاب شدند و طول ساقه‌چه و ریشه‌چه به‌وسیله خط‌کش برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

به‌منظور تعیین وزن تر به‌طور تصادفی از هر پتری‌دیش سه جوانه انتخاب شد و به‌وسیله ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام شد. برای به‌دست آوردن وزن خشک نمونه‌ها را در پاکت کاغذی قرار داده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت در آون خشک گردید و پس از آن‌ها نمونه‌ها به‌وسیله ترازوی ۰/۰۰۱ وزن شدند.

بذرهای گندم در سه غلظت ۱۰۰ ppm، ۲۰۰ ppm و ۵۰۰ ppm کمپلکس آهن و نانوذرات آهن به‌مدت ۲۴ ساعت خوابانده شدند، گلدان‌ها با مخلوطی ۴:۲ کوکوپیت و خاک پر شدند. در هر گلدان سه بذر در عمق ۱ سانتی‌متر، کاشته شد. گلدان‌ها در اتاقک رشد (Germinator) با دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد، ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی قرار داده شدند. از مرحله دو برگی با آب‌مقطر تغذیه شدند. در نهایت اندام‌های هوایی جهت آنالیزهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی برداشت شدند. اندازه‌گیری طول ریشه و ساقه پس از کشت گلدانی به‌وسیله خط‌کش صورت گرفت. برای به‌دست آوردن وزن خشک، نمونه‌ها را در پاکت کاغذی قرار داده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت در آون خشک گردید و پس از آن نمونه‌ها به‌وسیله ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند.

تهیه عصاره الکلی: به ۲ گرم پودر خشک‌شده اندام‌های هوایی گیاه، ۲ سی‌سی متانول ۷۰ درصد اضافه کرده و سر بشرها را با پارافیلم پوشانده و سپس بشرهای مورد نظر را روی دستگاه شیکر (تکان‌دهنده مغناطیسی) با دور ۱۵۰ به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد. بعد از طی زمان مورد نظر عصاره‌ها را ابتدا با استفاده از کاغذ واتمن صاف کرده و جهت هر چه بهتر شدن عصاره‌گیری، عصاره‌ها را به‌مدت ۱۵ دقیقه و با دور ۶۰۰۰ سانتریفیوژ نموده و سپس عصاره‌های بدست آمده به‌طور جداگانه درون ظروف تیره و استریل تا زمان انجام آزمایش در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

میزان فلاونوئید: میزان فلاونوئید تام به روش رنگ‌سنجی آلومینیوم کلرید با استفاده از کوئرستین (Quercetin) به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد (Chang *et al*., 2002). برای این کار به ۰/۵ میلی‌لیتر از هر عصاره، ۱/۵ میلی‌لیتر متانول (۸۰ درصد)، ۰/۱ میلی‌لیتر محلول آلومینیوم کلرید (۱۰ درصد متانولی)، ۰/۱ میلی‌لیتر استات پتاسیم (۱ مولار) و ۲/۸ میلی‌لیتر آب‌مقطر اضافه و خوب مخلوط گردید. سپس جذب مخلوط بعد از گذشت ۴۰ دقیقه در دمای اتاق، در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر نسبت به بلانک با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. بلانک حاوی تمام ترکیبات یادشده در بالا است اما به‌جای عصاره، همان حجم (۰/۵ میلی‌لیتر) متانول (۷۰ درصد) به آن اضافه کردیم. برای رسم منحنی استاندارد از کوئرسیتین استفاده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

شد. میزان فلاونوئید کل عصاره‌ها براساس میلی‌گرم معادل کوئرسیتین بر گرم وزن خشک گیاه DW mg QUE g^{-1} محاسبه شد. جذب‌های خوانده‌شده از نمونه‌ها به‌جای Y قرار داده شد و X یا همان غلظت به‌دست آمد (Chang *et al*., 2002).

Y=X۰/۰۱۲۷

منحنی استاندارد با محلول‌های کوئرسیتین متانولی در غلظت‌های مختلف تهیه شد و منحنی با نرم‌افزار Excel رسم گردید، سپس معادله خط Y = ax + b به‌دست آمد.

میزان فنل کل: میزان فنل تام براساس روش رنگ‌سنجی فولین- سیوکاتیو (Folin-ciocalteu) و با استفاده از ماده گالیک اسید به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد (Meda *et al*., 2005). برای این کار به ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره متانولی گیاه، ۲/۸ میلی‌لیتر آب‌مقطر و ۰/۱ میلی‌لیتر معرف فولین- سیوکالتیو ۵۰ درصد اضافه کرده، پس از ۵ دقیقه، ۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم (۷ درصد)، اضافه و خوب تکان دادیم. سپس به‌مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق نگهداری نموده و پس از آن جذب نوری نمونه‌ها را با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۷۶۰ نانومتر نسبت به شاهد (تمامی موارد فوق، فقط به جای عصاره همان حجم متانل ۷۰ درصد) ثبت کردیم. محتوای فنل کل براساس میلی‌گرم معادل گالیک اسید به گرم وزن خشک بافت DWmg GAE g^{-1} گیاه گزارش شد.جذب خوانده‌شده از نمونه‌ها به‌جای Y قرار داده شد و X یا همان غلظت به‌دست آمد (Meda*et al*., 2005).

Y=۰/۰۱۲۷ X – ۰/۰۱۶

منحنی استاندارد توسط غلظت‌های مختلفی از اسید گالیک در متانول تهیه و منحنی با نرم‌افزار Excel رسم گردید، سپس معادله خط Y = bx + a به‌دست آمد.

ارزیابی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌روش FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Potential): برای اندازه‌گیری توان آنتی‌اکسیدانی احیاء آهن از روش TPTZ(Tripyridyl-S-Triazine) استفاده شد. در این روش، معرفی ساخته می‌شود که حاوی TPTZ و $FeCl_3$ و بافر استات آنتی‌اکسیدانی‌هایی که توانایی احیای Fe^{3+} به Fe^{2+} را دارند، باعث تبدیل کمپلکس TPTZ-Fe^{3+} بی‌رنگ به کمپلکس TPTZ- Fe^{2+} می‌شود که به رنگ آبی بوده و در طول‌موج ۵۹۳ نانومتر شدت آن قابل اندازه‌گیری است. لوله‌های آزمایش به ۰/۰۲ میلی‌لیتر عصاره (با غلظت ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) با محلول FRAP که اضافه شد مخلوط فوق ۱۰ دقیقه در دمای ۳۷ قرار داده شد. دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۹۳ نانومتر توسط محلول کاری صفر گردید و سپس جذب نوری نمونه‌ها خوانده شد (Benzieand Strain,1999).

برای همه آزمایش‌ها سه تکرار در نظر گرفته شد و به منظور تجزیه و تحلیل و تعیین سطح معنی‌داری و همچنین مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار SPSS-22 و روش آناایز واریانس یک طرفه (ANOVA)، Toky و پس آزمون Duncan در سطح ۵ درصد استفاده شد و نمودارها با نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

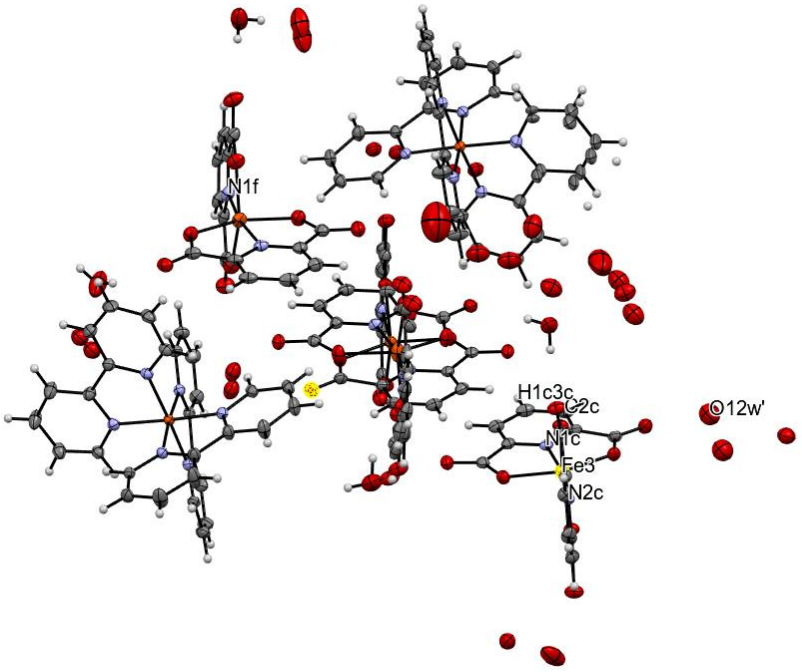
نتایج سنتز کمپلکس آهن و نانوذرات آهن، آنالیز عنصری کمپلکس آهن: نتایج آنالیز عنصری کمپلکس آهن در جدول ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که جدول نشان می‌دهد مقادیر تجربی و تئوری با هم در تطابق کامل هستند.

بررسی ساختار کمپلکس آهن: به‌منظور تعیین ساختار بلوری این کمپلکس از پراش پرتو ایکس استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز پرتو ایکس نشان داد که کمپلکس آهن دارای سیستم بلوری تری کلینیک و گروه فضایی P-1 است. همان طور که شکل نشان می‌دهد ساختار این کمپلکس دارای مراکز Fe (II) و Fe (III) است. بخش کاتیونی کمپلکس با فرمول $[Fe(bpy)_3]^{+2}$ از مراکز Fe (II) شش کوئوردینه تشکیل شده است که شش اتم نیتروژن از سه لیگاند دو دندانه بی پیریدین به این مرکز کوردینه شده‌اند و آهن دارای هندسه هشت وجهی واپیچیده است. کمپلکس آنیونی با فرمول $[Fe(dipic)_2]^{-2}$ دارای یک مرکز فلزی Fe (III) است که دو لیگاند دی پروتونه dipic که هر کدام به‌صورت سه دندانه شش

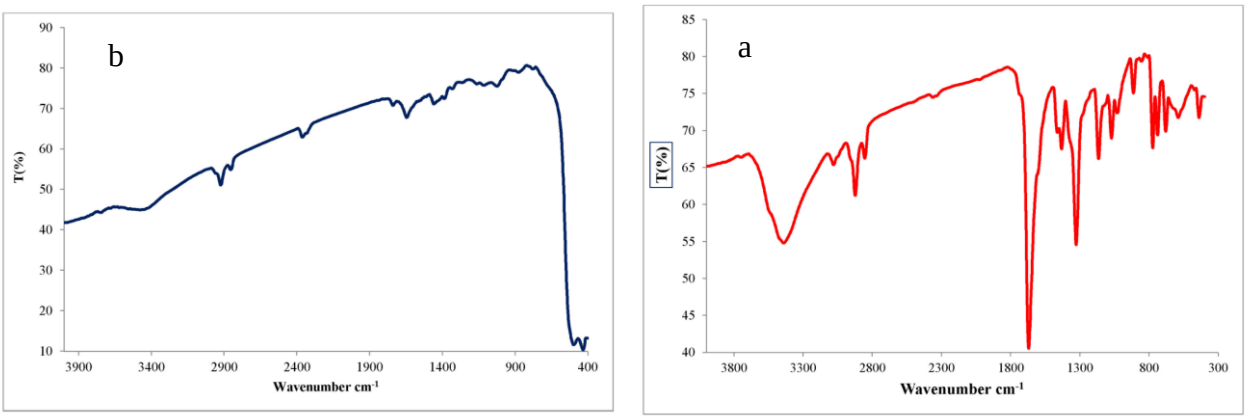
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

جدول ۱- آنالیز عنصری کمپلکس $[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$

$[Fe(bpy)_3][Fe(dipic)_2]_2.7H_2O$	H (%)	N (%)	C (%)
محاسبه‌شده	48.86	2.82	9.89
تجربی	49.24	2.78	9.81



شکل ۱- ساختار بلوری کمپلکس آهن



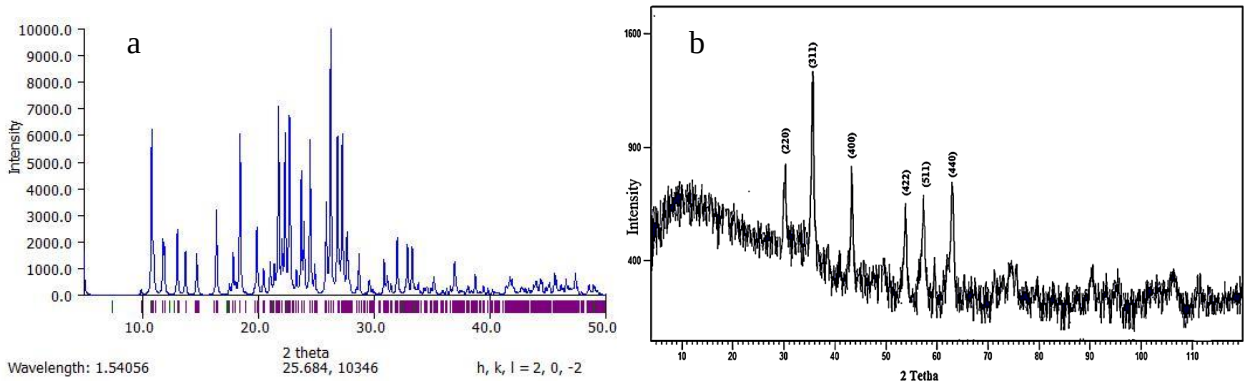
شکل ۲- طیف مادون قرمز (a) کمپلکس آهن و (b) اکسید آهن Fe_3O_4

موقعیت اطراف Fe را اشغال کرده و هندسه هشت وجهی انحراف یافته را برای این مرکز ایجاد کرده‌اند (شکل ۱).

بررسی طیف مادون قرمز کمپلکس و نانو ذرات آهن:

طیف زیر قرمز مربوط به کمپلکس آهن و نانو ذرات Fe_3O_4 حاصل از تجزیه حرارتی این کمپلکس در شکل ۲ نشان داده شده است. در طیف مادون قرمز کمپلکس آهن (2 a) پیک پهن مشاهده شده در ناحیه $۳۰۰۰-۳۵۰۰cm^{-1}$ به فرکانس کششی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۳- الگوی XRD کمپلکس آهن (a) و نانو ذرات آهن (b)

پیوند O-H مولکول‌های آب شبکه بلور نسبت داده می‌شود. پیک پهن و قوی مشاهده شده در $۱۶۵۰\ cm^{-1}$ متعلق به ارتعاشات کششی نامتقارن گروه‌های کربوکسیلات است که با ارتعاشات خمشی مولکول‌های آب همپوشانی می‌کنند. نوارهای مشاهده شده در ناحیه $۱۴۳۳\ cm^{-1}$ و ۱۳۲۷به فرکانس کششی نامتقارن گروه‌های کوبوکسیلات متعلق بوده و این گروه‌ها به‌صورت تک دندانه به مراکز فلزی متصل هستند همچنین ارتعاشات کششی مربوط به گروه‌های C-O در محدوده $۱۱۶۵\ cm^{-1}$ مشاهده می‌شوند. فرکانس‌های مشاهده شده در ۳۱۸۱ و $۲۹۲۴\ cm^{-1}$ به ارتعاشات کششی C-H نسبت داده می‌شود. ارتعاشات مشاهده‌شده در $۱۰۷۳\ cm^{-1}$ و $۲۹۲۴\ cm^{-1}$ به‌ترتیب به ارتعاشات خمشی داخل و خارج صفحه‌ای گروه‌های C-H نسبت داده می‌شود. طیف مادون قرمز نانو ذرات Fe_3O_4 حاصل از تجزیه حرارتی کمپلکس آهن در شکل (۲b) نمایش داده شده است. پیک پهن مشاهده شده در۳۰۰۰ تا$۳۳۰۰cm^{-1}$ به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H مولکول‌های آب جذب سطحی شده نسبت داده می‌شود. پیک در $۱۶۲۰cm^{-1}$ نیز متعلق به ارتعاشات خمشی مولکول‌های آب جذب سطحی شده است. پیک‌های ریز مشاهده شده در $۲۹۲۱cm^{-1}$ و $۱۱۴۵cm^{-1}$ به ارتعاشات کششی و خمشی مربوط به پیوند C-H حاصل از ناخالصی‌ها نسبت داده می‌شود. پیک مشاهده شده در $۵۹۸cm^{-1}$ و $۴۷۳cm^{-1}$ به ارتعاشات کششی پیوند Fe-O نسبت داده شد.

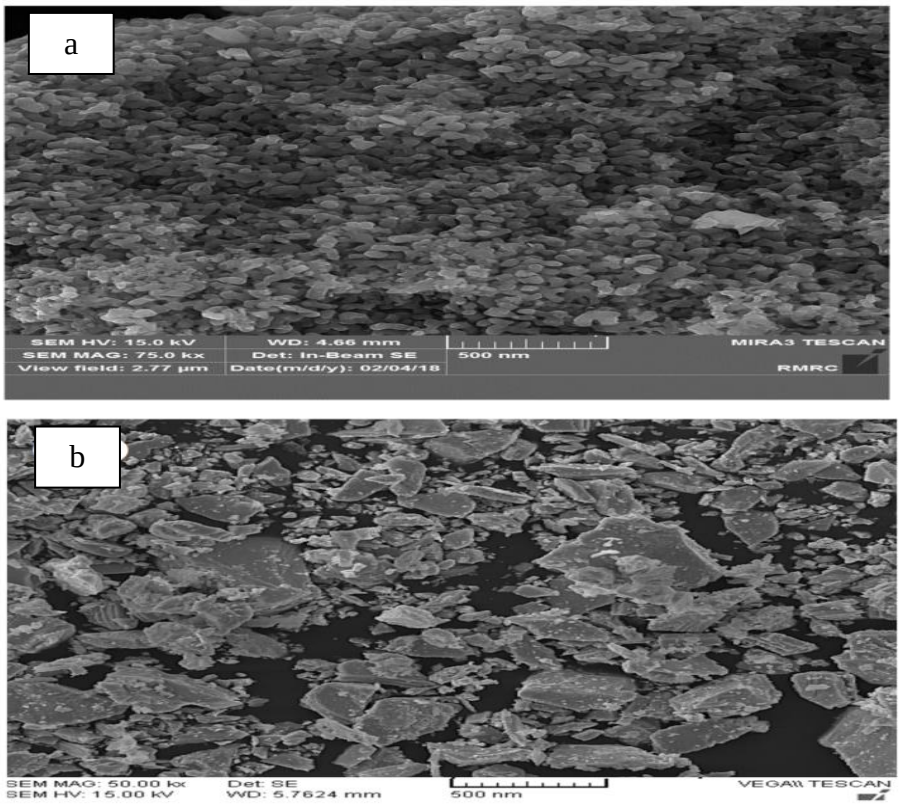
بررسی الگوی XRD کمپلکس و نانو ذرات آهن: شکل a ۳ الگوی XRD کمپلکس آهن را نشان می‌دهد.

این کمپلکس در سیستم تبلور تری کلینیک و گروه فضایی P-1 متبلور می‌شود. شکل ۳b الگوی XRD اکسید آهن Fe_3O_4 را نشان می‌دهد. این نانو اکسید دارای سیستم تبلور مکعبی و گروه فضایی P63mc است که با شماره کارت 1533–82 تطابق دارد. برای سنجش اندازه ذرات کمپلکس و نانو ذرات اکسید آهن از روش Shanan و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شده است. $D=0.9\lambda/(\beta Cos\theta)$ که در آن β عرض پیک در نیمه‌راه ارتفاع بر حسب رادیان، λ طول‌موج اشعه ایکس بر حسب نانومتر، D متوسط اندازه بلورک‌ها برحسب نانومتر وθ نصف زاویه تفرق برحسب رادیان است. براساس رابطه شرر اندازه متوسط ذرات کمپلکس آهن و اکسید آن به‌ترتیب برابر با ۷۸ nm و ۱۳ nm است.

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM: شکل ۴a تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید آهن تهیه شده به روش تجزیه حرارتی کمپلکس را نشان می‌دهد.

تصاویر SEM نشان می‌دهد که شکل و اندازه ذرات کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید Fe_3O_4 با یکدیگر متفاوت است. همان‌طور که شکل به وضوح نشان می‌دهد اندازه ذرات اکسید آهن Fe_3O_4 کوچکتر از کمپلکس آهن است اندازه ذرات با نرم افزار ImageJ نشان داد که آن‌ها به‌ترتیب دارای اندازه ذرات ۱۳ نانومتر و ۹۸ نانومتر هستند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM نانو ذرات (a) و نانو کمپلکس آهن (b)

جدول ۲- مساحت سطح ویژه وحجم حفره کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید آهن Fe_3O_4

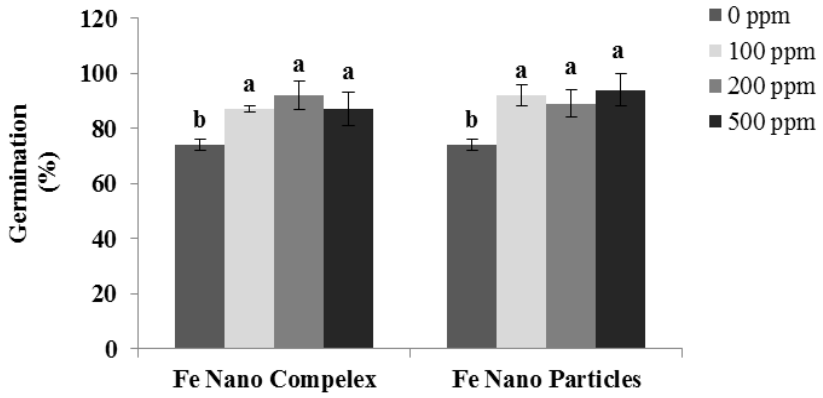
ترکیب	مساحت سطح ویژه BET(m^2/g)	حجم حفره (cm^3/g)
کمپلکس آهن	۳۲/۵	۰/۲۳
نانو ذرات Fe_3O_4	۹۷/۵۶	۰/۵۸۳

مساحت سطح ویژه BET: جدول ۲ مساحت سطح ویژه BET و حجم حفره را برای نانو کمپلکس آهن و نانو ذرات اکسید آهن حاصل را نشان می‌دهد. نتایج مساحت سطح ویژه BET در توافق خوبی با مشاهدات SEM است. مساحت سطح ویژه نانو ذرات اکسید آهن Fe_3O_4 که به روش تجزیه حرارتی کمپلکس آهن بدست آمده است بالاتر از کمپلکس آهن است که به کوچکتر بودن اندازه ذرات و کلوخه‌شدن کمتر آن نسبت داده می‌شود.

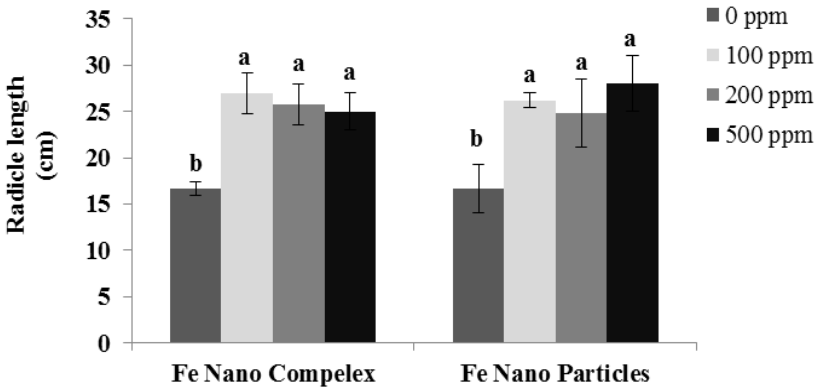
اثر کمپلکس و نانو ذرات آهن روی جوانه‌زنی بذرگندم: نتایج نشان داد جوانه‌زنی بذر گندم تحت تأثیر تمام غلظت‌های کمپلکس آهن و نانوذرات حاصل از آن به‌طور معناداری نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین جوانه‌زنی بذر گندم (۹۴٪) در غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن مشاهده شد. به‌طورکلی تفاوت معنی‌داری در میزان جوانه‌زنی تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نانو ذرات و نانوکمپلکس آهن مشاهده نشد. در نانوکمپلکس آهن نیز بیشترین جوانه‌زنی بذر گندم (۸۷٪) در غلظت ۲۰۰ppm دیده شد. همچنین هیچ یک از غلظت‌ها نسبت به هم افزایش معنی‌داری نداشتند (شکل ۵).

در تحقیقات دیگر نیز نتایج مشابهی بدست آمد. در آزمایش گلخانه‌ای روی گیاه گندم، کاربرد نانو ذرات اکسید آهن جوانه‌زنی را افزایش داد (مظاهری نیا و همکاران، ۱۳۹۰). در تحقیق دیگری نانو ذرات آهن باعث افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی گیاه کاج گردید (Temsah *et al.*, 2010). همچنین

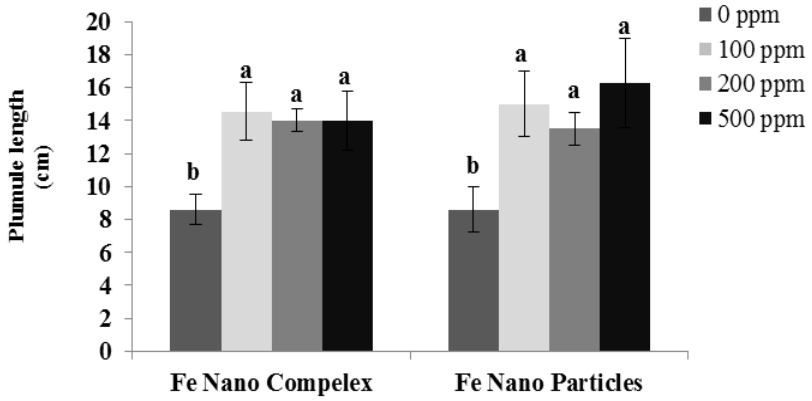
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۵- بررسی جوانه‌زنی بذر گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۶- بررسی اندازه‌گیری طول ریشه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۷- بررسی اندازه‌گیری طول ساقه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

نانو ذرات اکسیدآهن در گیاه گوجه‌فرنگی نیز جوانه‌زنی را افزایش داده است (Shankramma *et al.*, 2015). نتایج

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

مطالعات فیضی (۱۳۸۹) نشان داد که تأثیر کاربرد نانو ذرات اکسید آهن بر متوسط زمان جوانه‌زنی گندم معنی‌دار است. این اثرات احتمالاً به‌دلیل فراهم شدن ریزمغذی‌های بیشتر برای رشد گیاه، امکان عبور راحت‌تر نانوذرات ریزتر از دیواره سلول ریشه گیاه و اثرات مثبت گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از حضور نانو ذرات اکسید آهن است.

طول ریشه‌چه و ساقه‌چه: نتایج نشان داد که طول ریشه‌چه و ساقه چه گندم تحت تأثیر تمام غلظت‌های کمپلکس آهن و نانوذرات حاصل از آن به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت. اما میان غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانوذرات آهن اختلاف معنی‌دار وجود نداشت (شکل ۷ و ۶). نانو ذرات اکسید آهن، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاه گندم را افزایش داد (مظاهری نیا و همکاران، ۱۳۹۰). مصرف آهن به افزایش طول ساقه و شاخه فرعی در بوته ذرت منجر گردید (Sharafi *et al.*, 2000). در پژوهشی بیشترین طول شاخه نخود در تیمار محلول‌پاشی نانو کود کلات آهن مشاهده شد (Mir *et al.*, 2016). در آزمایش دیگری طول ساقه گیاه ریحان با کاربرد نانو کود کلات آهن افزایش معنی‌داری یافت (Nazari *et al.*, 2012). محلول‌پاشی نانو کود آهن رشد و عملکرد گیاه خیار (Javadimoghadam *et al.*, 2015)، گیاه کلزا (بیاتی و همکاران، ۱۳۹۳) بادام‌زمینی (Liu *et al.*, 2005) و گیاه دارویی مرزه (پیوندی و همکاران، ۱۳۹۰) آفتابگردان (ترابیان و زاهدی، ۱۳۹۲) و سیب‌زمینی (برقی و همکاران، ۱۳۹۳) را افزایش داد.

نانو ذرات اکسید آهن انتقال مواد فتوسنتزی و آهن را به برگ‌های گیاه تسهیل نموده و فتوسنتز و عملکرد آن را افزایش می‌دهد. افزایش عملکرد زیستی با مصرف عناصر ریزمغذی از جمله آهن علل مختلفی می‌تواند داشته باشد، که از آن جمله می‌توان به افزایش فعالیت فتوسنتزی و افزایش رشد گیاه اشاره نمود (Sharafi *et al.*, 2000).

وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه: نتایج مقایسه وزن خشک ساقه‌چه بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که هر دو ترکیب نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری دارند به‌طوری‌که بیشترین وزن خشک ساقه‌چه (۰/۰۰۱۷ g) مربوط به غلظت ۵۰۰ppm نانوذرات آهن است. تحت تأثیر نانوکمپلکس آهن نیز بیشترین وزن خشک ساقه‌چه (۰/۰۰۱۶ g) در غلظت ۵۰۰ppm به‌دست آمد (شکل ۸).

در بررسی وزن خشک ریشه‌چه نتایج نشان داد که تحت تأثیر هر دو ترکیب کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن، وزن خشک ریشه‌چه افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان می‌دهند. بیشترین وزن خشک ریشه‌چه (۰/۰۰۱۲g) در غلظت ۵۰۰ ppm نانو ذرات آهن و کمپلکس آهن مشاهده شد (شکل ۹).

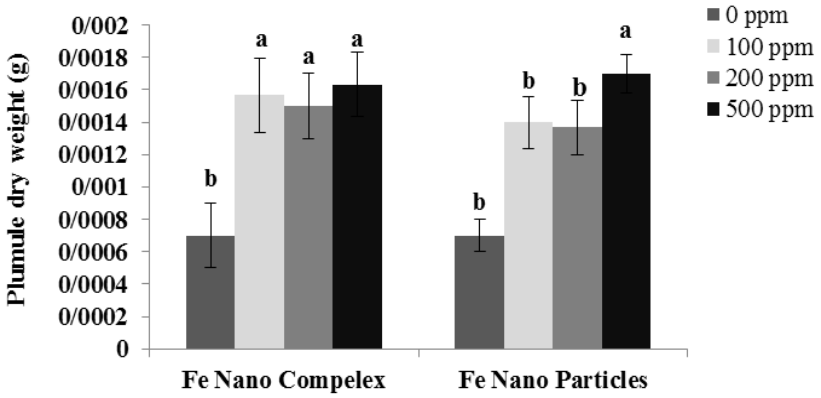
در مطالعات دیگر نیز نانو کود کلات آهن وزن خشک گیاه ریحان (پیوندی و همکاران، ۱۳۹۴)، گیاه اسفناج (Ladan Moghadam *et al.*, 2012)، گیاه بادام‌زمینی (Moosapoor *et al.*, 2013) و لوبیا چشم سیاه (Delfani *et al.*, 2014) را افزایش داد. نانو ذرات از قابلیت جذب بیشتری برخوردار بوده و می‌توانند به‌صورت مطلوب و در نقطه مناسبی در ناحیه رشد ریشه عناصر غذایی خود را آزاد کنند. نانو ذرات از طریق دیواره سلولی و غشاهای پلاسمایی لایه‌های اپیدرمی موجود در ریشه به بافت‌های آوند چوبی نفوذ کرده و از این طریق به ساقه و درنهایت به برگ‌ها منتقل می‌شوند (Said-Al Ahl and Abeer, 2010).

وزن تر ساقه‌چه و ریشه‌چه: نتایج مقایسه وزن تر ساقه‌چه بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که هر دو گروه نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری دارند به‌طوری‌که بیشترین وزن تر ساقه‌چه (۰/۱۸ g) مربوط به غلظت ۱۰۰ ppm کمپلکس آهن است. همچنین اختلاف بین غلظت‌های کمپلکس آهن نشان داد که غلظت ۱۰۰ ppm نسبت به ۲۰۰ppm و ۵۰۰ppm افزایش معنی‌داری دارد، مقایسه بین غلظت‌های نانو ذرات آهن نیز نشان داد که غلظت ۲۰۰ppm نسبت به غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۵۰۰ppm کاهش معنی‌داری دارد (شکل ۱۰).

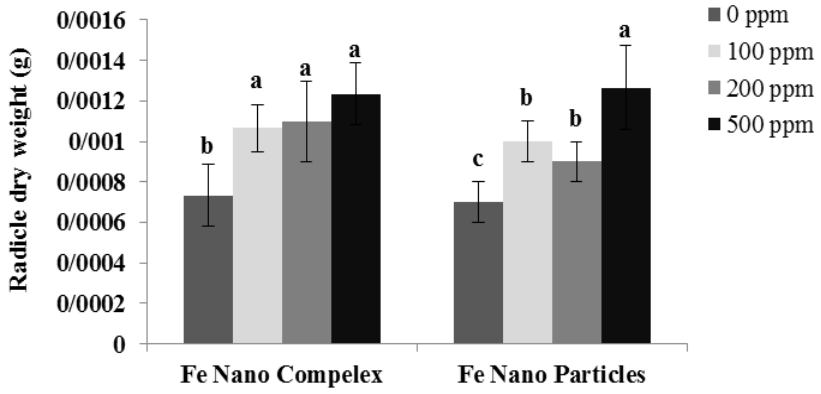
نتایج بررسی نشان داد که وزن تر ریشه‌چه گندم تحت تأثیر غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

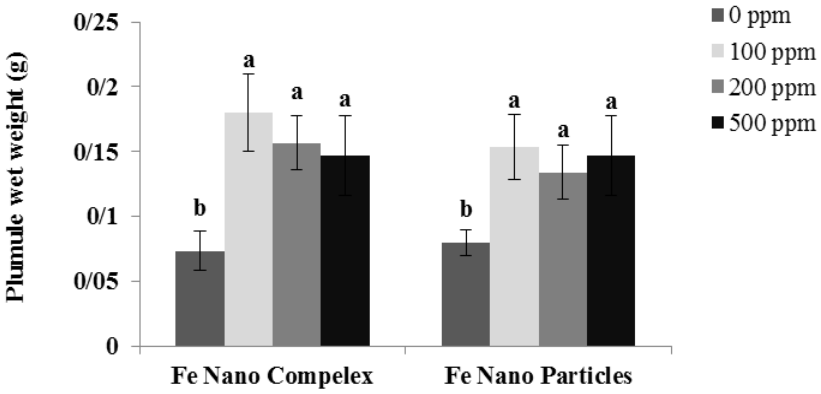
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۸- بررسی اندازه‌گیری وزن خشک ساقه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



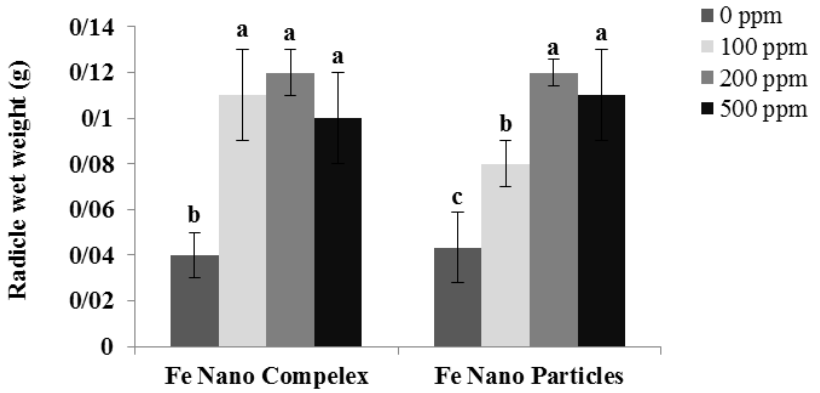
شکل ۹- بررسی اندازه‌گیری وزن خشک ریشه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۱۰- بررسی اندازه‌گیری وزن تر ساقه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافته است. به‌طوریکه بیشترین وزن تر ریشه‌چه گندم در غلظت ۲۰۰ppm و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۱۱- بررسی اندازه‌گیری وزن تر ریشه‌چه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

۵۰۰ppm نانو ذرات آهن مشاهده شد. تحت تأثیر نانوکمپلکس آهن نیز وزن تر ریشه‌چه گندم در تمامی غلظت‌ها به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۱۱).

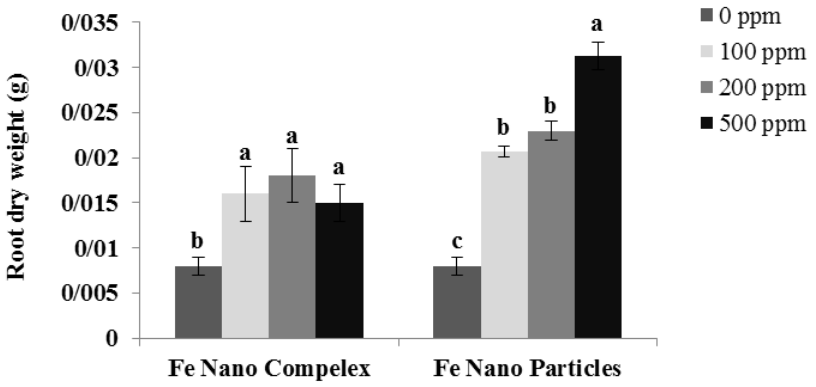
تأثیر مثبت نانو کود کلات آلی آهن بر افزایش وزن ساقه و ریشه گیاه برنج گزارش شده است (Baghaie *et al.*, 2012). در پژوهش احمدی و همکاران (۱۳۹۷) نانو ذرات اکسید آهن سبب افزایش معنی‌دار وزن تر ساقه لوبیا گردید. در پژوهش دلیل خاصیت نانو ذرات و حلالیت بیشتر آنها است.

وزن خشک ریشه و ساقه: نتایج مقایسه وزن خشک ریشه بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که تحت تأثیر هر دو ترکیب وزن خشک ریشه نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد. بیشترین وزن خشک ریشه (۰/۰۳g) مربوط به غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن بود. همچنین مقایسه غلظت‌های نانو ذرات نشان داد که تحت تأثیر غلظت ۵۰۰ppm افزایش معنی‌داری در میزان وزن خشک ریشه در مقایسه با غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm مشاهده شد (شکل ۱۲).

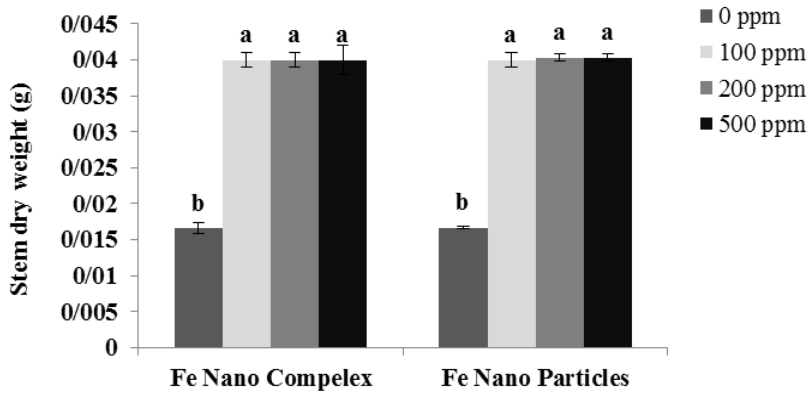
در بررسی وزن خشک ساقه نتایج مقایسه نشان داد که وزن خشک ساقه در هر دو ترکیب کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان می‌دهد. تحت تأثیر هر دو ترکیب، بیشترین وزن خشک ساقه (۰/۰۴g) مربوط به هر سه غلظت نانوکمپلکس آهن و نانو ذرات آهن بود. همچنین عبدالهی و همکاران (۱۳۹۷) بیشترین وزن ریشه و ساقه گندم در شرایط گلخانه‌ای در تیمار نانو ذرات اکسید آهن به‌دست آمد. با آزادسازی آرام و کنترل‌شده مواد غذایی، عناصر مورد نیاز گیاه تأمین می‌کنند. این احتمالاً به این دلیل بود که نانواکسید آهن بر اثر کوچک بودن ذرات، نسبت به اکسید آهن معمولی کمپلکس‌های بیشتری با کود تشکیل می‌دهد و در نتیجه حلالیت آهن و جذب نیز بیشتر می‌شود. این احتمالاً به بین غلظت‌های نانو ذرات و نانوکمپلکس آهن اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (شکل ۱۳).

در مطالعه امیدی نرگسی (۱۳۹۳) کاربرد نانو کود کلات آهن باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی گندم شد. محلول‌پاشی بوته‌های نخود با نانو کود آهن موجب افزایش وزن خشک ساقه گردید (Hamzei *et al.*, 2014). فتحی و زاهدی (۱۳۹۳) نشان دادند در اثر محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن، وزن خشک اندام هوایی گندم افزایش می‌یابد. Sheykhbaglou و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که نانو ذرات اکسید آهن باعث افزایش وزن خشک ساقه و وزن خشک برگ و غلاف سویا می‌شود. نریمانی (۱۳۹۸) نشان داد نانو اکسید آهن ماده خشک کل گندم را افزایش می‌دهد. این امر احتمالاً به‌دلیل خواص نانو ذرات شامل حلالیت بیشتر و سطح تماس بیشتر با ریشه گیاه است (مظاهری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰). احتمالاً به علت افزایش شدت فتوسنتز ناشی از جذب بیشتر آهن منجر به تولید با وزن بالا شده است.

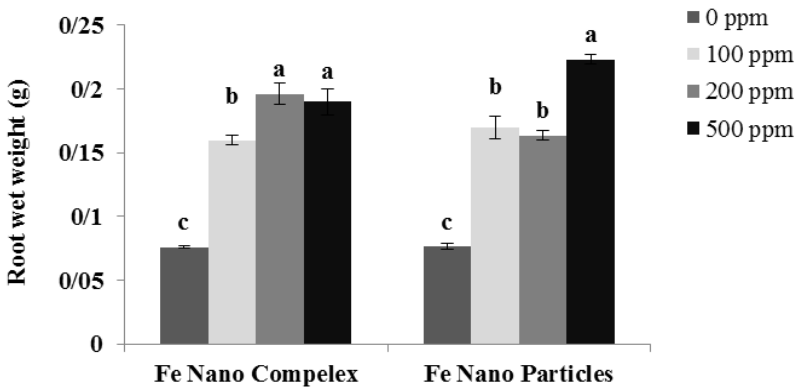
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۱۲- بررسی اندازه‌گیری وزن خشک ریشه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



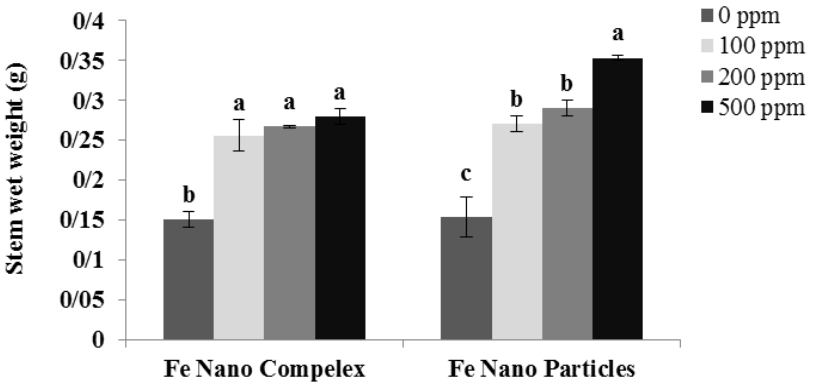
شکل ۱۳- بررسی اندازه‌گیری وزن خشک ساقه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۱۴- بررسی اندازه‌گیری وزن تر ریشه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن.میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

وزن تر ریشه و ساقه: نتایج مقایسه وزن تر ریشه بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که هر دو گروه نتایج

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۱۵- بررسی اندازه‌گیری وزن تر ساقه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری دارند به‌طوری‌که بیشترین وزن تر ریشه (۰/۲۲g) مربوط به غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن است. مقایسه بین غلظت‌های نانو ذرات آهن نیز نشان داد که وزن تر ریشه در غلظت ۵۰۰ppm نسبت به غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm افزایش معنی‌داری دارد.تحت تأثیر کمپلکس آهن بیشترین وزن تر ریشه در غلظت ۲۰۰ppm و ۵۰۰ppm به‌دست آمد. همچنین اختلاف بین غلظت‌های کمپلکس آهن نشان داد که وزن تر ریشه در غلظت‌های ۲۰۰ppm و ۵۰۰ppm نسبت به ۱۰۰ppm افزایش معنی‌داری دارد (شکل ۱۴).

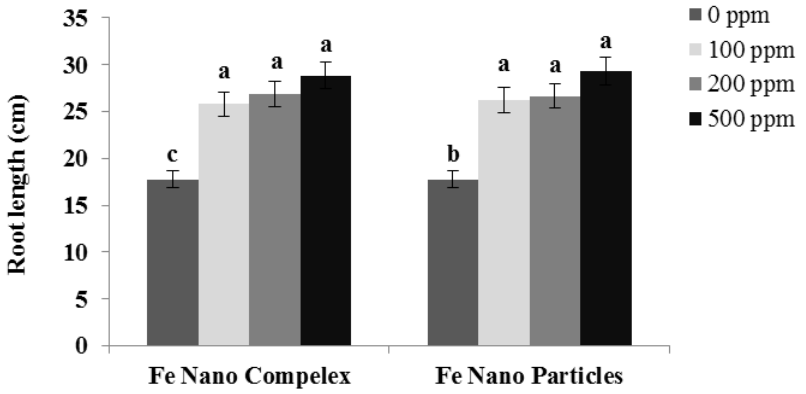
مقایسه مقدار وزن تر ساقه بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که تحت تأثیر هر دو گروه، وزن تر ساقه نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری دارند. بیشترین وزن تر ساقه (۰/۳۵g) مربوط به غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن بود. در مقایسه غلظت‌های نانو ذرات، وزن تر ساقه در غلظت ۵۰۰ppm نسبت به غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm افزایش معنی‌داری داشت. تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوکمپلکس آهن تفاوت معنی-داری در وزن تر ساقه مشاهده نشد (شکل ۱۵).

کاربرد کود نانو کلات آهن وزن تر گیاه اسفناج (Ladan Moghadam *et al.*, 2012)، گیاه ریحان (پیوندی و همکاران،۱۳۹۴)، گیاه بادام زمینی (Moosapoor *et al.*, 2013)، سویا (Schenkeveld *et al.*, 2010) و سورگوم (Johnson *et al.*, 2015) را افزایش داد. تأثیر نانو ذرات بر گیاه به ترکیب، غلظت، سایز و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین گونه‌های گیاهی بستگی دارد (Siddiqui *et al.*, 2015). نانواکسید آهن وضعیت تغذیه‌ای گیاهان را متعادل می‌کند. احتمالاً به‌دلیل عبور راحت‌تر نانو ذرات از دیواره سلول ریشه گیاه ریزمغذی‌های بیشتری برای رشد گیاه در دسترس قرار می‌گیرد، این امر سبب بهبود سیستم فتوسنتزی گیاه شده که نتیجه آن تولید انرژی بیشتر است و از این طریق غلظت عناصری که به‌صورت فعال و با صرف انرژی جذب گیاه می‌شوند را افزایش داده است.

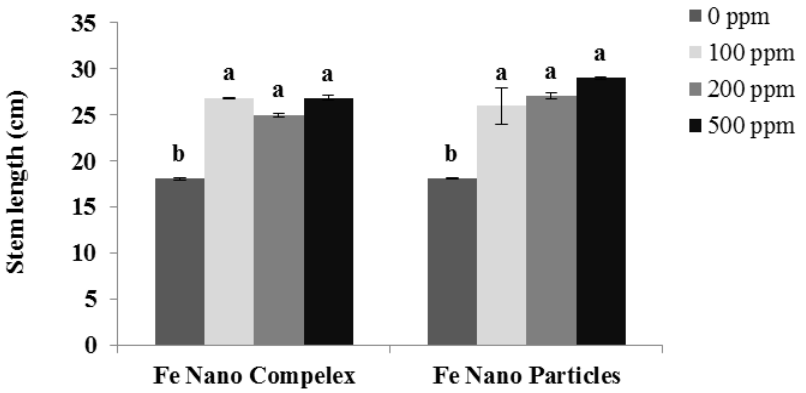
طول ریشه و ساقه: نتایج نشان داد که طول ریشه گندم تحت تأثیر غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافته است. به‌طوریکه بیشترین طول ریشه گندم (۲۹/۳۳cm) در غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن مشاهده شد. تحت تأثیر نانوکمپلکس آهن نیز بیشترین طول ریشه گندم (۲۸/۸۳cm) در غلظت ۵۰۰ppm دیده شد. همچنین مقایسه بین غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که اختلاف بین غلظت‌ها معنی‌دار نمی‌باشد (شکل ۱۶).

نتایج بررسی طول ساقه نشان داد که غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن طول ساقه گندم را به‌طور

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۱۶- بررسی اندازه‌گیری طول ریشه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



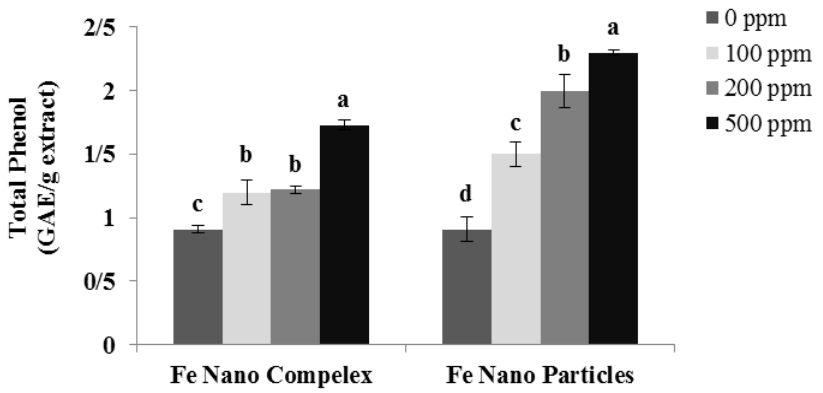
شکل ۱۷- بررسی اندازه‌گیری طول ساقه گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش می‌دهند. به‌طوریکه بیشترین طول ساقه گندم (۲۹cm) در غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن مشاهده شد. همچنین مقایسه بین غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که اختلاف بین غلظت‌ها معنی‌دار نمی‌باشد (شکل ۱۷).

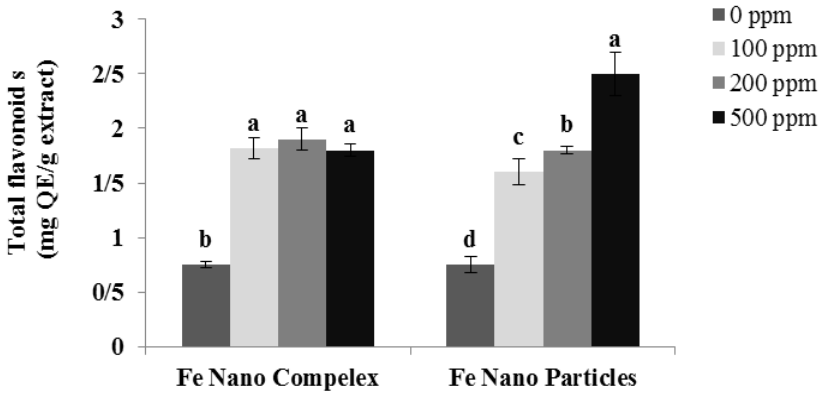
احمدی و همکاران (۱۳۹۷) نیز افزایش طول ساقه گیاه لوبیا را تحت تأثیر نانو ذرات اکسید آهن نشان دادند. براساس نتایج پژوهش Lannone و همکاران (۲۰۱۶) نانو ذرات اکسید آهن طول ریشه و ساقه گندم را به‌طور معنی‌داری نسبت به گروه شاهد افزایش داد. فتحی (۱۳۹۱) نیز نتیجه گرفت در اثر محلول‌پاشی اکسید آهن به فرم نانو ارتفاع گیاه گندم افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه Harsini و همکاران (۲۰۱۴) اثر افزایشی محلول‌پاشی نانو ذرات آهن را بر ارتفاع بوته گندم نشان داد. در پژوهش دیگری نانو کود آهن در بوته‌های نخود ارتفاع بوته و شاخه را افزایش داد (Hamzei *et al.*, 2014). Salarpour و همکاران (۲۰۱۳) در آزمایشی مشاهده نمودند که ارتفاع گیاه رازیانه با کاربرد نانو کود کلات آهن افزایش معنی‌داری یافت. در مطالعه Bozorgi (۲۰۱۲) بر روی گیاه بادمجان، ارتفاع گیاه و تعداد ساقه با کاربرد کود نانو کلات آهن به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

بهبود عملکرد توسط نانو ذرات آهن نسبت به آهن معمولی می‌تواند ناشی از کارایی ذرات آهن با ساختار نانو در رسانش و فراهمی بهینه عنصر آهن در فرآیندهای فیزیولوژیکی باشد. احتمالاً با فعال‌شدن فرآیندهای فیزیولوژیکی تشکیل کلروفیل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۱۸- بررسی اندازه‌گیری محتوای فنول گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۱۹- بررسی اندازه‌گیری محتوای فلاونوئید گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

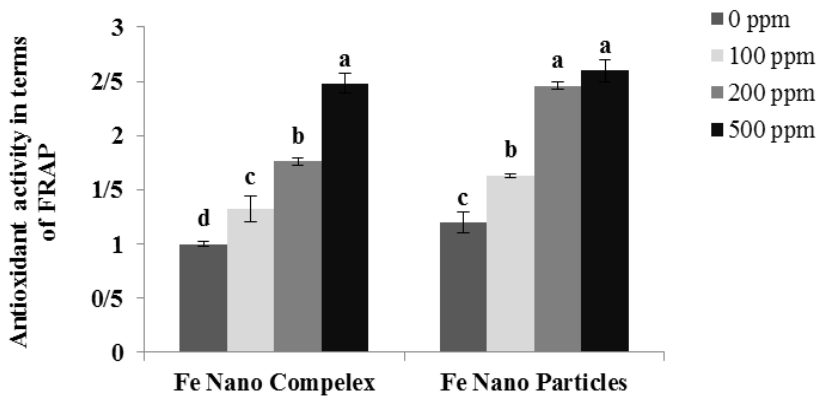
افزایش یافته که در پی آن بهبود فرآیند فتوسنتز اتفاق می‌افتد و نهایتاً منجر به افزایش ارتفاع گیاه تیمارشده با نانو ذرات آهن می‌شود.

محتوای فنول و فلاونوئید: نتایج تحقیق حاضر نشان داد که میزان فنول تحت تأثیر تمام غلظت‌های کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین محتوای فنول (۲/۳) در غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن مشاهده شد. تحت تأثیر نانوکمپلکس آهن نیز بیشترین محتوای فنول (۱/۷) در غلظت ۵۰۰ppm دیده شد. همچنین اختلاف بین غلظت‌های کمپلکس آهن نشان داد که محتوای فنول در غلظت ۵۰۰ppm نسبت به غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm افزایش معنی‌داری دارد. در مقایسه غلظت‌های نانو ذرات، محتوای فنول در غلظت ۵۰۰ppm نسبت به غلظت ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۱۸).

نتایج مقایسه میزان فلاونوئید بین کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن نشان داد که هر دو ترکیب محتوای فلاونوئید را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داده‌اند. بیشترین محتوای فلاونوئید مربوط به غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن است. اختلاف بین غلظت‌های نانو ذرات نشان داد که غلظت ۵۰۰ppm افزایش معنی‌داری با غلظت‌های ۱۰۰ppm و ۲۰۰ppm دارد (شکل ۱۹).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]



شکل ۲۰- بررسی اندازه‌گیری محتوای آنتی‌اکسیدانی گندم در غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات آهن. مقادیر نشان داده شده میانگین ۳ تکرار و SE ± (انحراف معیار) می‌باشد. میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر تیمار در غلظت‌های مختلف از نظر آماری در سطح (P≤0.05) تفاوت معنی‌دار ندارند.

گزارش شده که نانو ذرات اکسید آهن میزان فنول و فلاونویید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی سویا را افزایش داد (Sheykhbaglou *et al.*, 2010). در آزمایش دیگری که روی گیاه گیاه گندم صورت گرفت، محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن محتوای فنول و فلاونوئید گیاه را افزایش داد (Ghafari and Razmjoo, 2013).

میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی: نتایج بررسی نشان داد که فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کمپلکس آهن و نانو ذرات حاصل از آن به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافته است. به‌طوریکه بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن و کمپلکس آهن مشاهده شد. مقایسه بین غلظت‌های نانو ذرات نشان داد که غلظت ۱۰۰ppm کاهش معنی‌داری با غلظت‌های ۲۰۰ppm و ۵۰۰ppm دارد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی در غلظت ۵۰۰ppm کمپلکس آهن نسبت به غلظت ۱۰۰ppm و غلظت ۲۰۰ppm افزایش معنی‌داری نشان داد (شکل ۲۰).

افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گندم، تحت تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات آهن مشاهده شده است (Monica *et al.*, 2009). در مطالعه Lannone و همکاران (۲۰۱۶) فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان تیمارشده با نانو ذرات به‌طور معنی‌داری نسبت به گروه شاهد افزایش یافت. محلول-پاشی نانو ذرات اکسید آهن فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه گندم (Ghafari and Razmjoo, 2013)، گیاه سویا (Sheykhbaglou *et al.*, 2010) و گیاه یونجه (عسکری و همکاران، ۱۳۹۷) را افزایش داد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، برای اولین بار شاخص‌های رشد و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه گندم تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانو ذرات Fe_3O_4 حاصل تجزیه حرارتی آن بررسی شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که همه غلظت‌های کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانو ذرات حاصل از آن باعث افزایش رشد و میزان ترکیبات فنیل پروپانوئیدی و فغالیت آنتی‌اکسیدانی گردید. غلظت ۵۰۰ppm نانو ذرات آهن باعث بیشترین میزان شاخص‌های مختلف رشد از جمله جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول ریشه و ساقه، وزن تر و خشک ریشه و ساقه گردید. نتایج نشان داد، افزایش میزان ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، نشان‌دهنده فعال‌شدن سیستم دفاعی گیاه تحت تأثیر نانو ذرات آهن بود. براساس نتایج این تحقیق، کمپلکس سه‌هسته‌ای آهن و نانو ذرات حاصل از آن به‌عنوان محرکی مناسب جهت افزایش رشد و تولید ترکیبات فنلی پیشنهاد می‌شود.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است (شماره گرنت: IR-UOZ-GR-5521).

منابع

احمدی، ر.، جلیلی‌نژاد، ن. و حلی، م. (۱۳۹۷) بررسی اثر نانو ذرات اکسید آهن و اکسید آهن- سریم تولیدشده به روش هم رسوبی بر پارامترهای رشد گیاه لوبیا. نانو مواد (تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی) ۱۰: ۲۱۰-۲۰۱.

امیدی نرگسی، ص. (۱۳۹۳) تأثیر نانو کود کلات آهن بر واکنش ارقام گندم به تنش شوری در محلول غذایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی، اصفهان، ایران.

برقی، ع.، قلی‌پوری، ع.، توبه، ا.، جهانبخش، س. و جماعتی، ش. (۱۳۹۳) بررسی اثر محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر جذب عناصر غذایی در غده سیب‌زمینی. مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی ۱۶: ۱۲-۱.

بیاتی، ف.، آینه بند، ر. و فاتح، ا. (۱۳۹۳) بررسی تأثیر مقادیر و زمان‌های کابرد کود آهن نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.). نشریه پژوهش‌های زراعی ایران ۱۲: ۸۱۲-۸۰۵.

پیوندی، م.، پرنده، ه. و میرزا، م. (۱۳۹۴) مقایسه اثر نانو کود و کود کلات آهن بر کمیت و کیفیت اسانس ریحان (*Ocimum basilicum* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران ۳۱: ۱۹۳-۱۸۵.

پیوندی، م.، کمالی جامکانی، ز. و میرزا، م. (۱۳۹۰) تأثیر نانو کلات آهن با کلات آهن بر رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مرزه (*Satureja hortensis*). مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی- مولکولی ۲: ۳۲-۲۵.

ترابیان، ش. و زاهدی، م. (۱۳۹۲) تأثیر تغذیه برگی سولفات آهن به دو شکل معمول و نانو ذرات بر رشد آفتابگردان تحت تنش شوری. مجله علوم گیاهان زراعی ایران ۴۴: ۱۰۹-۱۱۸.

عبدالهی، ع.، تقوی، م.، نوروزی مصیر، م. و معزی، ع. ا. (۱۳۹۷) تأثیر نانو ذرات اکسید آهن عامل دار بر میزان جذب روی و برخی شاخص‌های رشدی گندم در شرایط گلخانه‌ای. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) ۴۱: ۱۴۶-۱۳۱.

عسکری، م.، امینی، ف.، طالبی، س. م. و شفیعی گواری، م. (۱۳۹۷) اثرات کلات آهن و نانو ذرات اکسید آهن بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه یونجه (*Medicago sativa* L.). تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۱: ۴۵۸-۴۴۹.

فتحی، ع. ر. (۱۳۹۱) تأثیر تغذیه برگی نانو ذرات آهن و روی بر پاسخ گندم و ذرت به تنش شوری پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی، اصفهان، ایران.

فتحی، ع. و زاهدی، م. (۱۳۹۳) تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن و روی بر رشد و محتوای یونی دو رقم گندم تحت تنش شوری. تولید فرآوری محصولات زراعی و باغی ۴: ۳۰۴-۲۹۵.

فیضی، ح. (۱۳۸۹) مطالعه نقش نانو ذرات فلزی (TiO_2, Fe_2O_3) و میدان مغناطیسی بر جذب عناصر غذایی، رشد و خصوصیات کمی و کیفی گندم. پایان‌نامه دکتری تخصصی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

مظاهری‌نیا، س.، آستارایی، ع.، منشی، ا. و فتوت، ا. (۱۳۹۰) مقایسه مقدار جذب و تجمع آهن در گندم (*Triticum aestivum* L.) با کاربرد اکسیدهای آهن معمولی و نانو همراه با کود کمپوست زباله شهری گرانوله گوگردی. نشریه زراعت ۹۲: ۱۱۱-۱۰۳.

نریمانی، ح.، سیدشریفی، ر.، خلیل‌زاده، ر. و امین‌زاده، غ. ر. (۱۳۹۸) تأثیر آبیاری تکمیلی و نانو اکسید آهن بر محتوای کلروفیل و مؤلفه‌های پرشدن دانه گندم (*Triticunm aestivum* L.) تحت شرایط دیم. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۲: ۷۳۵-۷۴۶.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

Amiry-Hosinkhani, M. A., Panahi Kordlaghari, K. H. and Balouchi, H. R. (2013) Effects of potassium and iron nutrient elements on the quantity yield of Shariar wheat cultivar in Boyerahmad Reign. Annals of Biological Research 4: 56-60.

Armin, M., Akbari, S. and Mashhadi, S. (2014) Effect of time and concentration of nano-Fe foliar application on yield and yield components of wheat. International Journal of Biosciences 4: 69-75.

Baghaie, N., Keshavarz, N. and Nazaran, M. H. (2012) Effect of nano iron chelate fertilizer on yield and yield components of Rice, Hashemi cultivar. 12th Iranian Crop Sciences Congress. Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran.

Benzie, I. F. F. and Strain, J. J. (1999) Ferric reducing/antioxidant power assay direct measure of total antioxidant. Methods Enzymol 10: 65-74.

Bozorgi, H. R. (2012) Study effects of nitrogen fertilizer management under nano iron chelate foliar spraying on yield and yield components of eggplant (*Solanum melongena* L). Agriculture Biological Sciences 7: 233-237.

Chang, C., Yang, M., Wen, H. and Chern, J. (2002) Estimation of total flavonoid co ntent in propolis by two complementary colorimetric methods. Journal of Food and Drug Analysis10: 178-182.

Das, R. et al. (2004) Integration of photosynthetic protein molecular complexes in solid-state. Electronic Devices Nano Letters 4: 1079-1083.

Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N. and Makarian, H. (2014) Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. Communications in Soil Science and Plant Analysis 45: 530-540.

DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R. and Sultan, Y. (2010) Nanotechnology in fertilizers. Nature Nanotechnology 5: 91.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2009) How to feed the world in 2050. Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. 24–26 June 2009. FAO Headquarters, Rome.

Ghafari, H. and Razmjoo, J. (2013) Effect of foliar application of nano-iron oxidase iron chelate and iron sulphate rates on yield and quality of wheat. International Journal of Agronomy and Plant Production 4: 2997-3003.

Hamzei, J., Najjari, S., Sadeghi, F. and Seyedi, M. (2014) Effect of foliar application of nano-iron chelate and inoculation with mesorhizobium bacteria on root nodulation growth and yield of chickpea under rainfed conditions. Iranian Journal of Pulses Reserch 5: 9-18.

Harsini, M. G., Habibi, H. and Talaei, G. H. (2014) Study the effects of iron nano chelated fertilizers foliar application on yield and yield components of new line of wheat cold region of kermanshah provence. Agricultur Advanced 3: 95-102.

Hochmuth, G. (2011) Iron (Fe) nutrition in plants. U. S. Department of Agriculture, UF/IFAS Extension Service, University of Florida, IFAS Document, SL353.

Javadimoghadam, A., Ladan Moghadam, A. and Danaee, E. (2015) Response of growth and yield of cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) to different foliar applications of nano- iron and zinc. International Research Journal of Applied and Basic Science 9: 1477-1478.

Johnson, A., Jokar, L. and Ronaghi, A. (2015) Effect of foliar application of different Fe levels and sources on growth and concentration of some nutrients in sorghum. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 6: 163-173.

Kornarzynski, K., Sujak, A., Czernel, G. and Wiacek, D. (2020) Effect of Fe_3O_4 nanoparticles on germination of seeds and concentration of elements in *Helianthus annuus* L. under constant magnetic field. Scientific Reports 10.

Ladan Moghadam, A., Vattani, H., Baghaei, N. and Keshavarz, N. (2012) Effect of different levels of fertilizer nano-iron chelates on growth and yield characteristics of two varieties of spinach (*Spinacia oleracea* L.): Varamin 88 and viroflay. Research in Applied Science and Engineering Technology 4: 4813-4818.

Lal, R. (2008) Soils and India's food security. Journal of the Indian Society of Soil Science 56: 129-138.

Lannone, F., Groppa, M., Sousa, M., Fernandez, R. M. and Benavides, M. P. (2016) Impact of magnetite iron oxide nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) development: Evaluation of oxidative damage. Environmental and Experimental Botany 131: 77-88.

Liu, R. and Lal, R. (2015) Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment 514: 131-139.

Liu, X. M., Zhang, F. D., Zhang, S. Q., He, X. S., Fang, R., Feng, Z. and Wang,Y. (2005) Effects of nano-ferric oxide on the growth and nutrients absorption of peanut. Plant Nutrition and Fertilizer Science 11: 14-18.

Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y. and Kolmakov, A. (2010) Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. Science Total Environment 408: 3053-3061.

Mastronardi, E., Tsae, P., Zhang, X., Monreal, C. and DeRosa, M. C. (2015). Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer International Publishing, Switzerland.

Meda, A., Lamien, C. E., Romito, M., Millogo, J. and Nacoulma, O. G. (2005) Determination of the total phenolic, etermi nation of the total phenolic, flavonoid and pralin contents in Burkina Fasan honey, as well as their scavenging activity. Food Chemistry 91: 571-577.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

Mir, Y., Danshvar, M., Nazaryan, F. and Khosravi, H. (2016) Effect of foliar application of nano iron chelate on yield and growth traits of rainfed chickpea cultivars. Journal of Plant Ecophysiology 24: 183-195.

Monica, R. C. and Cremonini, R. (2009) Nanoparticles and higher plants. Caryologia 62: 161-165.

Moosapoor, N. S., Sadeghi, M. and Bidarigh, S. (2013) Effect of bohr nanofertilizer and chelated iron on the yield of peanut in province guilan, iran. The Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences 3: 45-62.

Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y. and Sakthi Kumar, D. (2010) Nanoparticulate material delivery to plants: Review. Plant Sciences 179: 154-163.

Nazari, M., Mehrafarin, A., Naghdi Badi, H. and Khalighi-sigaroodi, F. **(**2012) Morphological traits of sweet basil (*Ocimum basilum* L.) as influenced by foliar application of methanol and nano-iron chelate fertilizers. Annals Biology Research 3: 5511-5514.

Peralta-Videa, J. R., Hernandez-Viezcas, J. A., Zhao, L., Diaz, B. C., Ge, Y., Priester, J. H., Ann Holden, P. and Gardea-Torresdey, J. L. (2015) Cerium dioxide and zinc oxide nanoparticles alter the nutritional value of soil cultivated soybean plants. Plant Physiology and Biochemistry 80: 128-135.

Said-Al Ahl, H. A. H. and Abeer, M. A. (2010) Effect of zinc and / or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. Ozean Journal ofApplied Sciences 3: 97-111.

Salarpour, O., Parsa, S. Sayyari, M. H. and Jami Alahmadi, M. (2013) Effect of nano-iron chelates on growth, peroxidase enzyme activity and oil essence of cress (*Lepidium sativum* L.). International Journal of Plant Production 4: 3583-3589.

Salem, T. and Elsheery, N. (2020) Nanomaterials: Scope, applications, and challenges in agriculture and soil reclamation. Sustainable Agriculture Reviews 41.

Saheli, S., Rezvani, A. R., Malekzadeh, A., Dusek, M. and Eigner, V. (2018) Novel inorganic precursors [Co4. 32Zn1. 68 (HCO_2) 18 (C_2H_8N) 6]/SiO_2 and Co_4. 32Zn1. 68 (HCO_2) 18 (C_2H_8N) 6]/Al_2O_3 for Fischer–Tropsch synthesis. International Journal of Hydrogen Energy 43: 685-694.

Schenkeveld, W. D., Reichwein, A. M., Bugter, M. H., Temminghoff, E. J. and van Riemsdijk, W. H. (2010) Performance of soil-applied Fe-EDDHA isomers in delivering Fe to soybean plants in relation to the moment of application. Journal Agriculture and Food Chemistry 58: 12833-12839.

Shanan, Z. J., Hadi, S. M. and Shanshool, S. K. (2018) Structural analysis of chemical and green synthesis of CuO nanoparticles and their effect on biofilm formation. Baghdad Science Journal 15.

Shankramma, K., Yallappa, S., Shivanna, M. B. and Manjanna, J. (2015) Fe_2O_3 magnetic nanoparticles to enhance *S. lycopersicum* (tomato) plant growth and their biomineralization. Applied Nano Science 6: 983-990.

Sharafi, S., Tajbakhsh, M., Majidi, A., Poormirza, A. and Malakooti, M. J. (2000) Evaluation effect of Fe and Zn on yield, protein and nutrition balance at two corn cultivar. Water and Soil 12: 85-94.

Sheykhbaglou, R., Sedghi, M., Shishevan, M. T. and Sharifi, R. S. **(**2010) Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. Notulae Scientia Biologicae 2: 112-113.

Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Firoz, M. and Al-Khaishany, M. Y. (2015) Nanotechnology and Plant Sciences. Springer International Publishing.

Tekrony, D. M., Tang, S., Egli, D. B. and Paul, L. (2000) An alternative model to predict corn seed deterioration during stirage. Crop Science 40: 463-470.

Temsah, E., Yehia Sayed, Y. and Erik, J. J. (2010) Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. Environmental Toxicology 27: 42-49.

UN (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division) (2013) World Population Prospects: the 2012 Revision.

Wang, X. and Cai, Q. S. (2010) Steel alag as an iron fertilizer for com growth and soil. Journal of Plant Physiology 132: 421-427.

Zhao, Y., Fang, X. and Mu, Y. (2014) Metal pollution (Cd, Pb, Zn, and As) in agricultural soils and soybean, *Glycine max*, in Southern China. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 92: 427-432.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]

The Effect of seeds priming with three metallic complex of iron and its Fe_3O_4 nanoparticlesresulting from its thermal decomposition on the some growth physiologic parameters of *Triticum aestivum*

Tahereh Jahantigh[1], Sedigheh Esmaeilzadeh Bahabadi[1], Zohreh Razmara[2], Parisa Hassanin[1]

[1] Department of Biology, Faculty of Science ,University of Zabol, Iran
[2] Department of Chemistry, Faculty of Science ,University of Zabol, Iran
(Received: 14/02/2022, Accepted: 21/06/2022)

Abstract

Wheat is one of the most important grains and considering the role of nanotechnology in crop production, it is very important to study the effect of nanoparticles on its growth processes. The aim of the present study was to investigate the effect of three metallic complex of iron and its Fe_3O_4 nanoparticles on growth and some physiological parameters of wheat. In this study, treatments included no seed priming (control), priming with different concentrations (100, 200 and 500 ppm) of iron complex and the iron nanoparticles. The structure of iron nanocomplexes were identified and confirmed by elemental analysis, infrared spectroscopy (FT-IR) as well as monocrystalline X-ray diffraction spectroscopy (SC-XRD). The structure of Fe3O4 nanoparticles was also studied by infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (SEM). The total phenolic content was determined using Folin-Ciocalteu assay and the amount of flavonoid was determined by colorimetry. Antioxidant activity was determined by FRAP method. The results showed that the prepared iron oxide nanoparticles had a smaller particle size and a larger specific surface area than the iron nanocomplex. The results showed that all growth and physiological parameters increased significantly under the treatment of all concentrations of iron complex and iron nanoparticles compared to the control. The highest seed germination (94%) was observed at the concentration of 500 ppm iron nanoparticles. Maximum root length (27 cm), stem length (16.3 cm), stem dry weight (1.7 mg), root dry weight (1.2 mg), root dry weight (0.03 g), stem dry weight (0.04 g), root length (29.33 cm) and stem length (29 cm) were observed at a concentration of 500 ppm iron nanoparticles. According to the results of this study, seed priming with iron nanoparticles is suggested as a suitable stimulant for increasing growth and production of phenolic compounds.

Keywords: Iron complex, Iron nanoparticles, Physiological parameters, Wheat plant

Corresponding author, Email: esmaeilzadeh@uoz.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.20.8]