

دکتر رضا احمدی، نویسنده
مسئول دانشگاه بین الملل امام
خمینی

بررسی اثر غلظت نانو ذرات اکسید آهن بر شاخص‌های رشد گیاه آبرزی علف مویی

سنا ربانی‌فرد^۱، فاطمه موسی‌خانی^۱، رضا احمدی^{*}

^۱ گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده: در پژوهش حاضر اثر استفاده از نانوذرات مگنتیت بر رشد طول و افزایش وزن گیاه آبرزی علف مویی بررسی شده است. در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن به روش هم‌رسوبی تولید شدند و برای بررسی مشخصاتشان از آنالیزهای XRD و SEM استفاده شد. برای تولید نانوذرات مگنتیت از کلرید آهن دو ظرفیتی $FeCl_2$ و کلرید آهن سه ظرفیتی $FeCl_3$ به عنوان منبع آهن و محلول سود سوزآور NaOH به عنوان عامل احیایی استفاده شد. نتایج SEM نشان داد میانگین اندازه ذرات به‌دست آمده در شرایط مختلف تولید ۱۸/۴ تا ۲۴/۷ نانومتر است و ریخت‌شناسی ذرات کرووی و شبه کرووی است. داده‌های XRD تایید‌کننده تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 با ساختار اسپینل معکوس است. با افزایش pH محلول، میانگین اندازه ذرات تولیدشده کاهش یافت. برای بررسی اثر غلظت نانوذرات اکسید آهن بر رشد گیاه، نانوذرات در غلظت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm به محیط رشد گیاه اضافه شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات اکسید آهن تا ۹۰ ppm نه تنها اثر منفی بر رشد گیاه نداشته است، بلکه باعث افزایش رشد طول گیاه و افزایش وزن نمونه گردیده است. نانوذرات اکسید آهن در غلظت‌های بالا در حدود ۱۲۰ ppm اثر منفی بر پارامترهای پیش‌گفته داشته است. با کاهش میانگین اندازه نانوذرات تولید شده افزایش بیشتری در رشد طول گیاه و وزن نمونه‌های گیاه علف مویی مشاهده شد که به دلیل سطح تماس بیشتر نانوذرات اکسید آهن با سلول‌های گیاه و افزایش ریزمغذی‌های فراهم شده لازم برای رشد گیاه است.

کلمات کلیدی: نانوذرات، مگنتیت، علف مویی، هم‌رسوبی، ریزمغذی.

۱- مقدمه

فناوری نانو بر بهبود عملکرد گیاهان برای جذب مواد غذایی، بهبود جوانه زنی، تولید گیاه، دفع آفات و امراض گیاه، ایجاد بستر کاشت گیاه و غیره تاثیر دارد. میزان جذب نانوذرات توسط گیاهان متفاوت بوده و بستگی به نوع گیاه، ترکیب شیمیایی و اندازه این ذرات دارد [۱]. نتایج برخی از پژوهش‌ها حاکی از اثر مثبت استفاده از نانوذرات بر رشد گیاهان بوده و برخی نشانگر کاهش رشد گیاه در حضور نانوذرات است [۲-۴]. نانو ذرات مگنتیت به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله خصوصیات مغناطیسی و واکنش‌پذیری بالا، دارو رسانی، سنجش پادتن و گرما درمانی کاربردهای گسترده‌ای دارند [۵-۷]. ذرات اکسید آهن حاصل از فوران آتش‌فشان، آتش سوزی‌ها و فعالیت‌های صنعتی همیشه در طبیعت و در تعادل با اکوسیستم‌های طبیعی وجود داشته اند. سمیت این ذرات در محیط‌های مختلف به ویژه محیط‌های آبی و تاثیرات منفی آن بر عملکرد موجودات زنده ثابت شده است [۸-۱۰]. بیشترین اثر سمی مشاهده شده در این نانوذرات شامل کاهش رشد گیاهچه و ایجاد لکه‌های قهوه‌ای بر روی برگ‌ها می‌باشد [۱۱، ۱۲].

محققان جذب، انتقال و تجمع نانوذرات Fe_3O_4 را در گیاهان مورد مطالعه قرار دادند و متوجه حرکت این نانوذرات در سلول‌های گیاهی شدند، همچنین مشاهده کردند حضور این نانوذره باعث کاهش محتوی کلروفیل می‌گردد [۱۳].

ورود نانوذرات مگنتیت به بافت‌های گیاهی در مطالعات مختلف مشاهده شده است. ژو و همکاران با مطالعه تاثیر نانوذرات مگنتیت بر بافت‌های گیاه کدو متوجه جذب و انتقال و تجمع این نانو ذره

در بافت‌های گیاه کدو شدند. نتایج تحقیق انجام شده نیز نشان دهنده تاثیر نانو اکسید آهن بر جوانه زنی و رشد اولیه گیاهان می باشد. بیشتر محققان بر این باورند تاثیر سمی قابل ملاحظه ای توسط این نانو ذره ایجاد می شود که شامل ایجاد تنش اکسایشی^۱، تاثیر بر فتوسنتز و کاهش سرعت فرآیند متابولیکی می باشد [۱۴].

سمیت نانوذرات مگنتیت به ویژه در غلظت‌های بالا در مطالعات مختلفی ثابت شده است، از جمله تاثیر نانوذرات مگنتیت با غلظت های صفر، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ mg/ml بر گیاه آبی Lemnagibba مطالعه و کاهش محتوی کلروفیل، کاهش فتوسنتز، کاهش وزن تر گیاه (۵۲ تا ۵۹ درصد) و کاهش تعداد ساقه‌های جانبی (۳۲ تا ۴۹ درصد) مشاهده شده است. همچنین کاهش رشد و جوانه زنی گیاه خیار در محیط هیدروپونیک پس از ۶ روز مجاورت با نانوذرات Fe_3O_4 با غلظت ۵۰۰ و ۱۵۰۰ gr/mlit گزارش شده است. تیمار نانوذرات مگنتیت به ویژه در غلظت‌های بالا بر گیاهان ایجاد فشار اکسایشی می کند. این فشار اکسایشی بر عمل فتوسنتز تاثیر می گذارد و در نهایت کاهش سرعت فرآیندهای متابولیک را در گیاهان به دنبال دارد [۱۱]. پندی در آزمایشی بر روی نخود گزارش کرد که کاربرد اکسید روی به شکل نانو ذرات تاثیر بیشتری در افزایش رشد گیاه نسبت به شکل معمول آن داشته است که به دلیل سطح ویژه بالای نانوذرات است [۱۵].

اوکاروم و همکاران نشان دادند که نانوذرات نقره با اندازه میانگین حدود ۵۰ نانومتر می‌توانند به طور مستقیم بر روی رشد گیاه جلبک تاثیر گذارند. نانوذرات نقره ۵۰ نانومتری ممکن است نتواند وارد سلول گیاه شوند، اما می‌توانند به عنوان یک پل ارتباطی به سلول دیگر باشند که در نهایت باعث سرعت بخشیدن در تجمع سلولی و رشد بیشتر گیاه می‌شوند [۱۶، ۱۷].

تجمع نانوذرات اکسید روی و اکسید تیتانیوم باعث محصور شدن دریاچه های سلولی گیاه جلبک می شود [۱۷]. همچنین نانوذرات اکسید سلیسیم توسط سطح جلبک جذب شده و این مسئله باعث کاهش رشد می‌شود [۱۸].

محیط زیست آبی مهم‌ترین و شاید آخرین مقصد انتشار نانومواد به محیط زیست است. گیاهان آبی نیز بخش عمده نخستین تولید کنندگان آبی را به خود اختصاص می‌دهند و اساس شبکه غذایی محیط‌های آبی هستند [۱۹]. عدسک‌ها در سرتاسر جهان از آب‌های شیرین، نه‌رهای آبیاری تا تالاب‌ها و باتلاق‌ها پراکنده شده‌اند و در سطح آب شناور می‌باشند. این گیاه به دلیل کشت آسان در آزمایشگاه مورد توجه می‌باشد [۲۰]. این گیاه در جهت حذف نیترات از محیط آبی که آثار نامطلوب دارد مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱].

به عنوان نمونه هی و همکاران نشان دادند که نانوذرات نقره در غلظت ۰/۲ mg/lit برای گیاه *chattonella marina* سمی می باشند [۲۲]. اوکاروم و همکاران به بررسی اثر نانوذرات نقره ۵۰ nm به یک گونه ریز جلبک آب شیرین (*chlorella vulgaris*) و یک گونه ریز جلبک آب شور (*Dunaliellatertidecta*) پرداختند و نشان دادند که این نانوذرات باعث کاهش شدید محتوای کلروفیل و زنده مانی سلول‌ها و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و پرواکسیداسیون چربی‌ها می‌شوند. در مطالعه دیگر هزنی و همکاران به بررسی اثر نانوذرات نقره بر گونه آب شیرین *C. Vulgaris* و گونه آب شور *D. Tertideta* پرداختند و نشان دادند که غلظت‌های بالای ۱۰۰ و ۲۰۰ mg/lit نانوذرات نقره باعث مرگ سلولی و ایجاد استرس اکسیداتیو پلانکتون‌های مورد بررسی می‌شوند [۱۶، ۲۳]. بنابراین نانوذرات نقره حتی در کمترین غلظت مورد آزمون نیز باعث ایجاد سمیت در ریز جلبک دریایی *Nanochlolopsis* گردیده‌اند و درواقع حضور این نانوذرات در محیط کشت جلبک مذکور مانع تقسیم سلولی و افزایش عادی تعداد سلول‌ها گردیده‌اند و همچنین با نتایج به‌دست آمده، با افزایش هرچه بیشتر غلظت نانوذرات نقره در محیط کشت، کاهش رشد جلبک‌ها نیز بیشتر قابل مشاهده بوده است که نشان می‌دهد تاثیر این نانو ذره بر ریز جلبک مورد مطالعه وابسته به غلظت است [۲۲، ۲۴، ۲۵].

گزارش تاثیر مثبت و منفی نانو ذرات بر گیاهان متداول است و پژوهشگران بررسی‌هایی در مورد تاثیر نانوذرات بر جوانه زنی گیاه و رشد آن با هدف ترویج نانوذرات برای استفاده در کاربردهای کشاورزی انجام داده‌اند. با این حال بررسی‌ها تایید کرده‌اند که نانوذرات می‌توانند در گیاهان سمیت ایجاد کنند و تاثیر منفی بر جوانه زنی بذر و رشد گیاه داشته باشند اما در عین حال ویژگی های انحصاری نانوذرات می‌توانند موجب بهبود جوانه زنی بذر و عملکرد محصول شوند [۲۶]. برای مثال نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی، اکسید تیتانیوم، مگنتیت و نانوذرات فلزی منگنز موجب بهبود رشد گیاهانی همچون گوجه فرنگی، تنباکو،

^۱ Reactive Oxygen Speices, ROS

ارزن، لوبیا، نخود، سورگوم، اسفناج و گندم شده است [۲۷].

در مطالعه دیگری تاثیر نانوذرات اکسید آهن ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) و یون های آهن (Fe^{3+}) بر رشد گیاهان پومیلو یا دارابی (citrus Maxima) بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که غلظت 50 mgr/lit نانو ذرات اکسید آهن سبب افزایش قابل توجه غلظت کلروفیل ($23/8\%$) و فعالیت آنزیم و هیدروناز ($23/2\%$) نسبت به نمونه شاهد شده، اما در غلظت 100 mgr/lit تولید مالون دی آلدیید ($\text{Malondialdehyd} = \text{MDA}$) را افزایش داده که موجب کاهش غلظت کلروفیل و فعالیت آنزیم و هیدروناز و نهایتاً کاهش رشد گیاه شده است. آنان دلیل این اثرهای منفی نانوذرات اکسید آهن را تجمع نانوذرات در سطح ریشه می دانند که از انتقال آب به برگ ها جلوگیری می کند. همچنین آسیب های اکسایشی که بر اثر حضور نانوذرات در سلول ایجاد می شود می تواند موجب تخریب کلروپلاست و کاهش غلظت کلروفیل در برگ ها شود [۲۸].

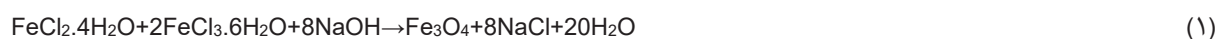
مکانیسم توانایی نانوذرات در جذب آب به درون بذر که منجر به اثرات مثبت پیش گفته در رشد گیاه می شود، هنوز کاملاً شناخته شده نیست. یک فرضیه پیشنهادی به توانایی نانوذرات برای ایجاد منافذ جدیدی بر می گردد که نفوذ آب و ریزمغذی ها در پوسته بذر را تسهیل می کنند و به این ترتیب سرعت جوانه زنی را افزایش می دهند. احتمال دیگر به توانایی نانوذرات اکسیدی و فلزی و نانولوله های کربنی در تنظیم کانال های آب موجود در پوسته بذر گیاه مرتبط است. به این ترتیب که نانوذرات با تأثیر بر ژن های تنظیم کننده کانال های پروتئینی یا با ممانعت از باز شدن کانال ها، انتقال آب به داخل پوسته بذر را کنترل کنند [۲۹].

یافته های محققان نشان می دهد که نانوذرات اثرات مثبت و منفی بر رشد و توسعه گیاهان دارند و تأثیرات نانوذرات به ترکیب، غلظت، اندازه و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن ها و نیز به گونه های گیاه بستگی دارد و از گیاهی به گیاه دیگر متفاوت است [۲]. تاکنون در مورد گیاهان آبی پژوهش های کمتری نسبت به گیاهان غیرآبی انجام شده است، همچنین در بسیاری از پژوهش ها غلظت بهینه تعیین نشده و تنها اثر مثبت یا منفی نانوذرات بر پارامترهای رشد گیاه آبی بررسی شده است [۲-۸، ۱۰، ۱۲، ۱۸-۲۱]. نکته بسیار مهم در این موارد، استفاده از کمترین دوز نانوذرات با بیشترین تأثیر مثبت بر رشد گیاه است تا اثرات سوء جانبی نانوذرات بر استفاده کننده محصولات گیاهی به حداقل برسد [۱، ۲]. به بیان دیگر، پارامترهای رشد گیاه با افزایش غلظت بسیاری از نانوذرات افزایش می یابد و با رسیدن به غلظت بهینه، روند کاهشی رشد گیاه آغاز می شود. بررسی و تعیین این غلظت بهینه، اهمیت بسیاری در سلامت محصولات گیاهی فرآوری شده با نانوذرات دارد. در پژوهش حاضر نانوذرات مگنتیت به روش همرسوبی در شرایط مختلف تولید و با روش های XRD و SEM مشخصه یابی شده اند. در ادامه، با توجه به خلاءهای پیش گفته، اثر غلظت و اندازه نانوذرات مگنتیت بر رشد گیاه آبی علف مویی بررسی و شده است. همچنین تغییرات غلظت با هدف تعیین نقطه تغییر روند افزایشی به روند کاهشی رشد گیاه مورد توجه قرار گرفته تا محدوده غلظت بهینه مشخص شود.

۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- مواد اولیه و تولید نانوذرات

در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن Fe_3O_4 با استفاده از مقادیر به ترتیب $0/464$ و $0/1708$ گرم مواد اولیه $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ و محلول NaOH برای تنظیم pH و آب مقطر به عنوان حلال به روش همرسوبی مطابق واکنش (۱) تولید شد. با توجه به حضور ۲ مول آهن سه ظرفیتی و ۱ مول آهن دو ظرفیتی در ۱ مول مگنتیت، در بسیاری از فرایندهای تولید نانوذرات مگنتیت بر مبنای روش همرسوبی، از نسبت استکیومتری ۲ به ۱ نمک آهن سه ظرفیتی به نمک آهن دو ظرفیتی استفاده شده است [۳۰-۳۲] و در پژوهش حاضر همین نسبت در نظر گرفته شده است:



ابتدا با استفاده از همزن مغناطیسی محلول $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ و $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ با حلال آب مقطر تهیه و سپس با افزودن قطره قطره محلول NaOH رسوبات سیاه رنگی ظاهر شد و این کار تا جایی ادامه داشت تا به $\text{pH} = 11$ رسید (نمونه C1). این مراحل به طور مشابه برای دستیابی به $\text{pH} = 11/5$ نیز صورت گرفت (نمونه C2). سپس پس از چند بار شستشو با آب مقطر و استون رسوبات حاصل توسط آهنربای قوی از آب مقطر حلال جدا شده و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای 40°C درجه سانتیگراد آن قرار گرفت.

با استفاده از دستگاه XRD مدل Siemens D5000 مجهز به لامپ اشعه X با طول موج $1/5406$ آنکستروم ساختار کریستالوگرافی نانوذرات تولیدشده مورد بررسی قرار گرفته و به منظور بررسی شکل و اندازه نانوذرات با استفاده از دستگاه SEM مدل Philips XL 30، تصاویر میکروسکوپی از ذرات تهیه شد. بعد از مشخصه یابی به روش های فوق، سوسپانسیون هایی با غلظت ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm از نانوذرات سنتز شده در pH های ۱۱ و ۱۱/۵ برای نمونه های مختلف تهیه شد.

۲-۲- پرورش گیاه و تاثیر نانو ذره بر رشد آن

در این پژوهش هدف بررسی تاثیر نانو ذرات Fe_3O_4 بر برخی پارامترهای رشد گیاه علف مویی است. این گیاه گونه ای چند ساله آبی از جنس Eleocharis در خانواده جنگلیان بوده و به نام های دیگری همچون spikerush، چمن مویی و سوزنی موسوم است و برای رشد نیازمند نور متوسط، دما و pH مطلوب آب بوده و به بستری غنی از مواد مغذی نیازمند است. این گیاه رشد سریع دارد و رشد ساقه آن بیش از ۱۰ سانتی متر است.

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر نانوذرات سنتز شده بر پارامترهای رشد گیاه، ابتدا ۲۷ گلدان برای نمونه های گیاه آبی علف مویی آماده و شرایط مناسب دما، نور، رطوبت و آب نیز مهیا شد؛ سپس بذرهایی مشابه از این نوع گیاه آبی از لحاظ وزن و ظاهر انتخاب و برای جوانه زنی در محیطی با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و نور متوسط قرار گرفت و پس از ۸ روز که جوانه های گیاه مشاهده و طول آن ثبت شد، جوانه های مشابه از نظر طول ریشه، طول گیاه و وزن جداسازی شده و در هر گلدان حاوی ۱۵۰ cc آب با pH=۷، یک نمونه از گیاه قرار گرفت.

گیاهان پس از قرارگیری در آب به صورت معلق در گلدان قرار گرفته و به تدریج ریشه گیاه با کف گلدان برخورد کرد و در ادامه فرآیند، سوسپانسیون ها در چهار غلظت مختلف به گلدان های حاوی جوانه گیاه و آب افزوده و تاثیرات آن بر پارامترهای رشد مشاهده شد. همچنین نمونه های شاهد بدون افزودن نانوذرات جهت مقایسه با نمونه های حاوی سوسپانسیون نیز در نظر گرفته شد. پس از ۱۰ روز طول ساقه گیاه اندازه گیری شده و میزان رشد نمونه ها محاسبه و نسبت به رشد نمونه های شاهد ثبت شد (شکل ۱).



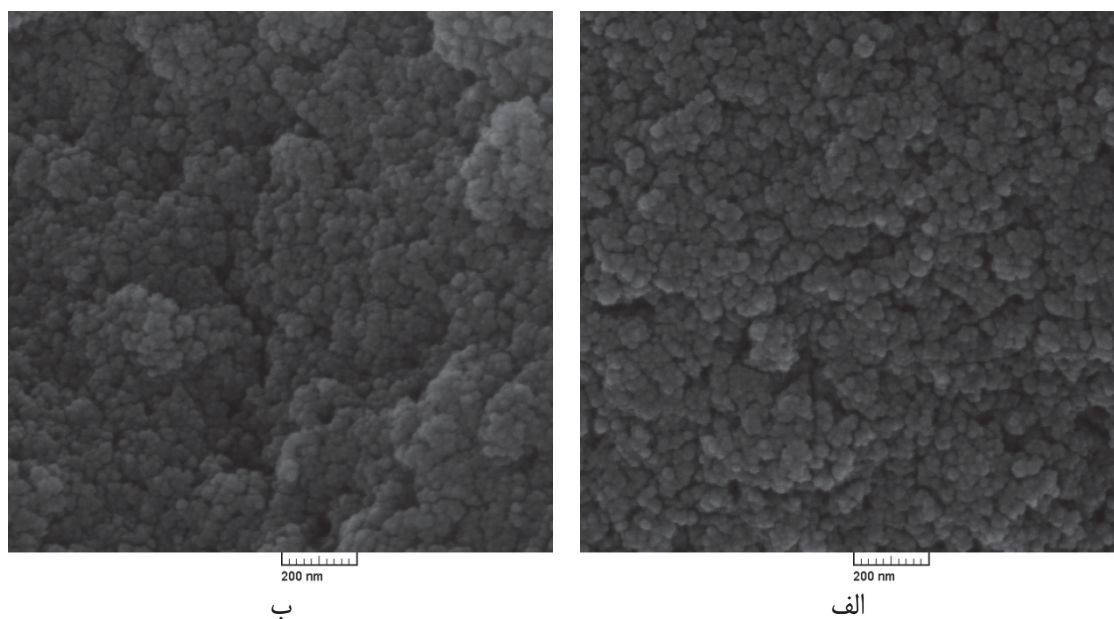
شکل ۱- نمونه خشک و تر گیاه آبی ۱۰ روز پس از جوانه زنی.

پس از این مرحله با خارج کردن گیاهان از آب رشد گیاه متوقف شده و وزن گیاه نیز اندازه گیری شد. میزان ارتفاع گلدان ها در این پژوهش پارامتر مهمی در رشد گیاه به شمار می رود، چرا که گیاه در صورت خروج از آب و رشد ساقه دچار خشک شدگی در قسمت بالایی می شود. این پژوهش ۳ مرتبه مشابه مراحل فوق تکرار شد تا میزان خطای حاصل به حداقل برسد.

۳-۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ تصویر SEM نمونه های C1 و C2 نشان داده شده است. با استفاده از نتایج شکل ۲ و در نظر گرفتن ۵۰ ذره برای هر نمونه، میانگین اندازه ذرات نمونه C1 و C2 به ترتیب برابر $24/7$ و $18/4$ nm به دست آمد. دلیل کاهش اندازه ذرات با افزایش pH به افزایش تجمع آنیون های OH^- بر سطح جوانه ها و ذرات اولیه مگنتیت برمی گردد. دافعه الکترواستاتیکی ناشی از بارهای

سطحی همنام مانع تجمع و به هم پیوستن جوانه‌ها و ذرات ریز اولیه شده و منجر به کاهش میانگین اندازه نانوذرات مگنتیت می‌شود که با مکانیزم جوانه زنی و رشد مطابق واکنش (۱) تولید می‌شوند. نتیجه مشابهی پیش از این توسط این گروه پژوهشی گزارش شده است [۳۰].

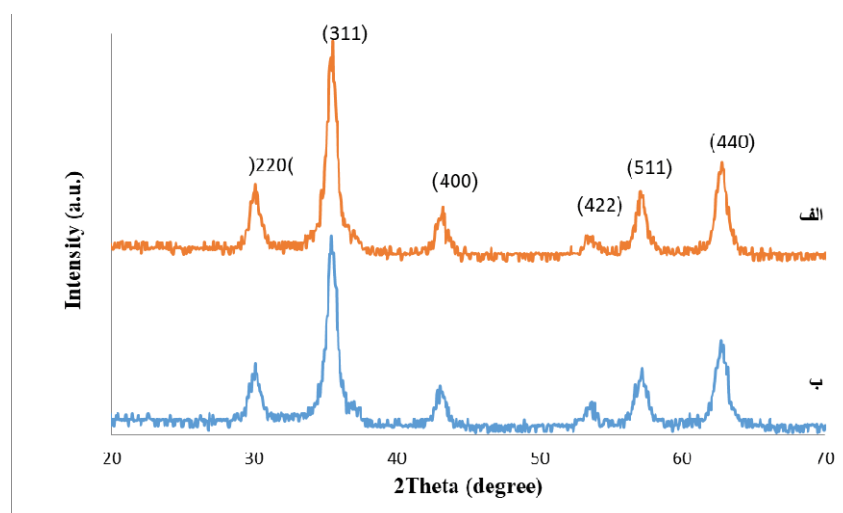


شکل ۲- تصویر SEM (الف) نمونه C1 و (ب) نمونه C2 به ترتیب با میانگین اندازه ذرات ۲۴/۷ و ۱۸/۴ نانومتر.

نمودار XRD نمونه C1 و C2 در شکل ۳ نشان داده شده است. پیک‌ها و اندیس‌های میلر مشخص شده مربوط به صفحات بلوری ساختار اسپینل معکوس مگنتیت منطبق با کارت JCPDS شماره 19-0629 و نشانگر تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 مطابق واکنش (۱) است. اندازه بلورک‌های نمونه C1 و C2 با استفاده از رابطه شرر^۱ محاسبه شد:

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \quad (2)$$

که t اندازه بلورک، λ طول موج اشعه X ، β عرض پیک اصلی در نصف شدت بیشینه و θ_B زاویه براگ است. با در نظر گرفتن پیک اصلی (311) و $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ، اندازه بلورک محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳- طرح XRD (الف) نمونه C1 و (ب) نمونه C2.

¹ Scherrer equation

جدول ۱- اندازه بلورک و میانگین اندازه ذرات نمونه های C1 و C2

نمونه	β (degree)	2 θ B (degree) برای صفحه (۳۱۱)	tXRD(nm) اندازه بلورک	dSEM(nm) میانگین اندازه ذرات
C1	0.72	35.52	11.6	24.7
C2	0.96	35.54	8.7	18.4

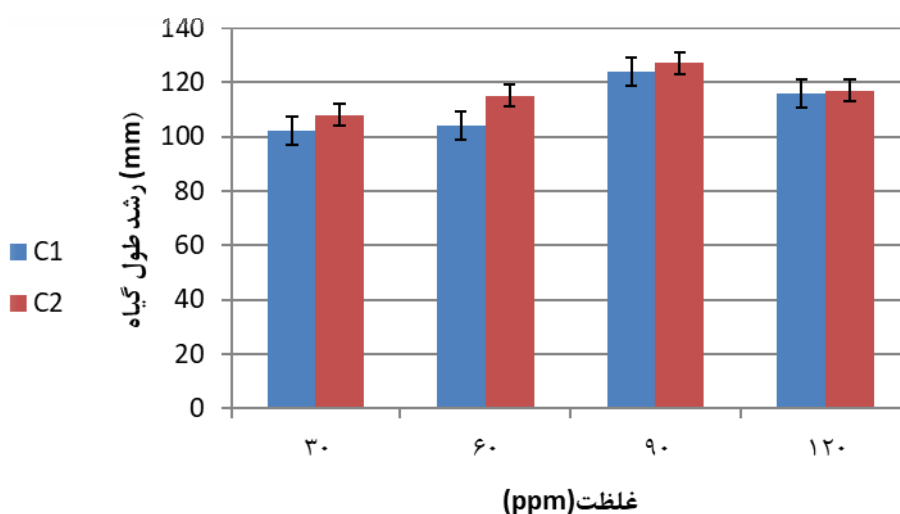
سوسپانسیون نانوذرات نمونه C1 و C2 با pH خنثی و غلظت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm به گلدان‌های حاوی آب و جوانه‌های گیاه آبی‌زی افزوده شد. پس از ۱۰ روز طول ساقه و وزن گیاه اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۴).



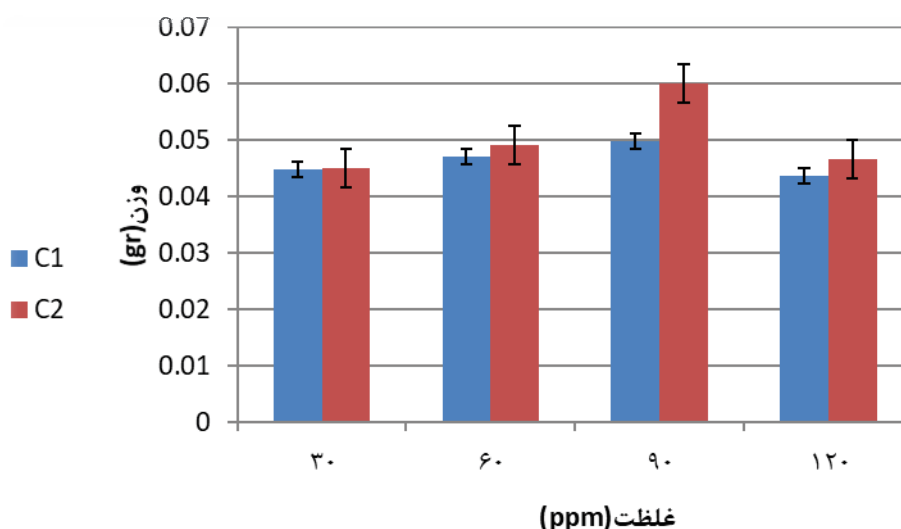
شکل ۴- مقایسه رشد ساقه نمونه در غلظت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ ppm نانوذرات نمونه C2.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات نمونه C2 از ۳۰ تا ۹۰ ppm طول گیاه با رشد صعودی روبه‌رو بوده و در غلظت ۱۲۰ ppm رشد ساقه گیاه کاهش یافته است که احتمالاً به دلیل آسیب رسیدن به غشاء پلاسما و دیواره سلول گیاه در غلظت بالا بوده است. در غلظت پایین سطح تماس نانوذرات با خاک و بافت گیاه و دسترسی گیاه به ریزمغذی‌ها افزایش یافته و عبور نانوذرات از دیواره سلول ریشه گیاه آبی‌زی راحت‌تر شده است.

شکل ۵ و ۶ نمودار تغییرات وزن بر حسب غلظت و رشد طول گیاه بر حسب غلظت را در pHهای ۱۱ و ۱۱/۵ نشان می‌دهند.



شکل ۵- تغییرات طول گیاه آبی‌زی با غلظت نانوذرات نمونه C1 و C2.



شکل ۶- تغییرات وزن گیاه آبی با غلظت نانوذرات نمونه C2 و C1.

نتایج شکل ۵ و ۶ نشانگر آن است که طول ساقه و وزن گیاه در معرض نانوذرات نمونه C2 رشد بیشتری نسبت نمونه C1 دارد. نانوذرات نمونه C2 میانگین اندازه ذرات کمتری نسبت به نمونه C1 دارند (۱۸/۴ nm نسبت به ۲۴/۷ nm). بنابراین سطح تماس بیشتری با غشاء سلول‌های ساقه و ریشه گیاه و کانال‌های انتقال آب ایجاد می‌کنند. این اثر به نوبه خود باعث فراهم شدن ریزمغذی‌های بیشتر و افزایش اثرات مثبت ROS و نهایتاً افزایش نرخ رشد گیاه می‌شود. با افزایش غلظت نانوذرات به دلیل اثرات پیش‌گفته وزن و طول گیاه افزایش بیشتری نشان می‌دهد. این روند افزایشی رشد طول گیاه و وزن با افزایش غلظت تنها تا غلظت ۹۰ ppm ادامه داشته و در غلظت ۱۲۰ ppm به دلیل احتمالی آسیب رسیدن به غشاء پلاسما و دیواره سلولی، کاهش رشد طول گیاه و وزن مشاهده می‌شود. اثر اخیر به خوبی در هماهنگی با داده‌های پژوهش‌های پیشین است که کاهش جوانه زنی و رشد در غلظت‌های بالای نانوذرات را نشان می‌دهد [۱-۴، ۲۸].

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نانوذرات مگنتیت به روش هم‌رسوبی تولید شدند. نتایج XRD و SEM نشانگر تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 با میانگین اندازه حدود ۱۸ تا ۲۴ نانومتر است. با افزایش pH، میانگین اندازه ذرات به دلیل دافعه الکترواستاتیکی بارهای هم‌نام ناشی از افزایش غلظت آنیون هیدروکسید در سطح جوانه‌ها و نانوذرات اولیه کاهش یافت. افزایش وزن و طول ساقه گیاه علف مویی که نشانگر افزایش رشد گیاه است، با کاهش میانگین اندازه نانوذرات اکسید آهن در محیط آبی بیشتر شده که به دلیل افزایش سطح تماس نانوذرات با سلول‌های ریشه و ساقه گیاه و فراهم آوردن مسیرهای بهتر انتقال آب و ریزمغذی‌های مورد نیاز برای رشد گیاه است. با افزایش غلظت نانوذرات تا ۹۰ ppm به دلیل افزایش اثرات مثبت پیش‌گفته رشد گیاه افزایش یافت. در غلظت ۱۲۰ ppm به دلیل آسیب رسیدن به سلول‌های گیاهی و اثرات منفی ROS، رشد گیاه علف مویی کاهش یافت. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد نانوذرات مگنتیت در غلظت‌های پایین باعث افزایش رشد گیاه علف مویی شده‌اند و با کاهش اندازه ذرات این اثر مثبت تشدید می‌شود.

مراجع

- [1] V. Ghormade, M.V. Deshpande, K.M. Paknikar, "Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants" *Biotechnology advances* 29 (2011) 792-803.
- [2] A. Rastogi et al., "Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review" *Frontiers in chemistry* 5 (2017) 78-86.
- [3] S. Asli, Neumann P.M., "Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport" *Plant, cell & environment* 32 (2009) 577-584.

- [4] R. Raliya et al., "Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant" *Metallomics* 7 (2015) 1584-1594.
- [5] A. Besson-Bard et al., "Nitric oxide contributes to cadmium toxicity in *Arabidopsis* by promoting cadmium accumulation in roots and by up-regulating genes related to iron uptake" *Plant Physiology* 149 (2009) 1302-1315.
- [6] N. Singh et al., "Potential toxicity of superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPION)" *Nano reviews* 1 (2010) 5358-5369.
- [7] S.M. Kraemer, "Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores", *Aquatic sciences* 66 (2004) 3-18.
- [8] I. Bhatt, B.N. Tripathi, "Interaction of engineered nanoparticles with various components of the environment and possible strategies for their risk assessment", *Chemosphere* 82 (2011) 308-317.
- [9] S.J. Klaine et al., "Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects", *Environmental toxicology and chemistry* 27 (2008) 1825-1851.
- [10] J.R. Peralta-Videa et al., "Nanomaterials and the environment: a review for the biennium 2008-2010", *Journal of hazardous materials* 186 (2011) 1-15.
- [11] F. Aslani et al., "Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview" *The Scientific World Journal* 2014 (2014) 1-28.
- [12] W. Liu et al., "Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature riceplants (*Oryza sativa* L.)" *Environmental Science & Technology* 40 (2006) 5730-5736.
- [13] X. Chen et al., "Photosynthetic toxicity and oxidative damage induced by nano-Fe₃O₄ on *Chlorella vulgaris* in aquatic environment" *Open Journal of Ecology* 2 (2012) 21-28.
- [14] Y. Ma et al., "Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants" *Chemosphere* 78 (2010) 273-279.
- [15] A.C. Pandey, S. S. Sanjay, R. S. Yadav, "Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*" *Journal of Experimental nanoscience* 5 (2010) 488-497.
- [16] A. Oukarroum et al., "Inhibitory effects of silver nanoparticles in two green algae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta*", *Ecotoxicology and environmental safety* 78 (2012) 80-85.
- [17] J. Ji, Z. Long, D. Lin, "Toxicity of oxide nanoparticles to the green algae *Chlorella* sp." *Chemical Engineering Journal* 170 (2011) 525-530.
- [18] C. Wei et al., "Effects of silica nanoparticles on growth and photosynthetic pigment contents of *Scenedesmus obliquus*" *Journal of Environmental Sciences* 22 (2010) 155-160.
- [19] R. Liang et al., "Enhanced degradation of persistent pharmaceuticals found in wastewater treatment effluents using TiO₂ nanobelt photocatalysts" *Journal of nanoparticle research* 15 (2013) 1990-1998.
- [20] T. Perreault, "What kind of governance for what kind of equity? Towards a theorization of justice in water governance" *Water International* 32 (2014) 233-245.
- [21] Y.A. Wali, H.A. Okbi, R.A. Abri, "A comparison of two transfusion regimens in the perioperative management of children with sickle cell disease undergoing adenotonsillectomy" *Pediatric hematology and oncology* 20 (2003) 7-13.
- [22] D. He, J.J. Dorantes-Aranda, T.D. Waite, "Silver Nanoparticle-Algae Interactions: Oxidative Dissolution, Reactive Oxygen Species Generation and Synergistic Toxic Effects" *Environmental science & technology* 46 (2012) 8731-8738.
- [23] A.A. Hazani et al., "Ecotoxicity of Ag-nanoparticles on two microalgae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta*" *Archives of Biological Sciences* 65 (2013) 1447-1457.
- [24] E. Navarroet al., "Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*" *Environmental science & technology* 42 (2008) 8959-8964.
- [25] A.J. Miaoe et al., "The algal toxicity of silver engineered nanoparticles and detoxification by exopolymeric substances" *Environmental pollution* 157 (2009) 3034-3041.
- [26] L.R. Khot et al., "Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review" *Crop protection* 35 (2012) 64-70.
- [27] A. Servin, et al., "A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield" *Journal of Nanoparticle Research* 17 (2015) 92-101.
- [28] J. Yang, W. Cao, Y. Rui, "Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms" *Journal of plant interactions* 12 (2017) 158-169.

- [29] M. Khodakovskaya et al., "Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth" *ACS nano* 3 (2009) 3221-3227.
- [30] R. Ahmadi et al., "Ultrasonic-assisted synthesis of magnetite based MRI contrast agent using cysteine as the biocapping coating" *Materials Chemistry and Physics* 131 (2011) 170-177.
- [31] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, B. Safari, E. Nshingabigwi, "Temperature-dependent magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesized via coprecipitation method" *Journal of Alloys and compounds* 846 (2020) 156344.

[۳۲] اثنی عشری ح. و عربی ه.، سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به روش هم‌رسوبی و بررسی تاثیر نسبت غلظت مواد واکنش دهنده بر اندازه و خواص مغناطیسی ذرات، مجله علم و مهندسی سرامیک، سال ۲، شماره ۱ ص ۷۷-۸۴ بهار ۱۳۹۲.