

مقایسه اثر تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر رشد و تغییرات فتوسنتزی گوجه‌فرنگی در سیستم هیدروپونیک

مریم حقیقی^{۱*} و بهاره دانشمند^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۲۵)

چکیده

تیتانیوم دارای اثرهای سودمندی بر رشد، فیزیولوژی و فعالیت‌های متابولیسمی گیاهان است. از طرفی، تمایل به استفاده از کودهای نانو با پیشرفت فن‌آوری مورد توجه خاص است. در این راستا، آزمایشی گلخانه‌ای در محیط کشت هیدروپونیک طراحی شد که تیتانیوم و نانوتیتانیوم در دو غلظت ۱ و ۲ میلی‌گرم بر لیتر به محلول غذایی اضافه شد و محلول غذایی بدون اعمال این تیمارها به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. قالب طرح، کاملاً تصادفی با ۴ تکرار بود و تغییرات رشد و فاکتورهای فتوسنتزی گوجه‌فرنگی بررسی گردید. بر طبق نتایج به‌دست آمده، اثر افزودن نانوتیتانیوم به محلول غذایی بر رشد ریشه بیش از ساقه بود و در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر مثبت‌تری بر وزن تر و خشک ریشه داشت. تیتانیوم و نانوتیتانیوم باعث افزایش تعرق، فتوسنتز و دی‌اکسید کربن داخل روزنه‌ای شدند. تأثیر نانوتیتانیوم بر میزان تعرق و فتوسنتز بیش از تیتانیوم بود و در غلظت‌های بیشتر، آثار مثبت آن افزایش یافت. میزان کلروفیل، حجم ریشه، وزن خشک و تر ساقه و زمان ظهور اولین گل تحت تأثیر تیمارهای تیتانیوم و نانوتیتانیوم قرار نگرفت. به‌طورکلی، تیتانیوم در غلظت بیشتر و نانوتیتانیوم به‌دلیل اندازه کوچک ذرات و امکان نفوذ راحت‌تر به ریشه، می‌تواند بر برخی ویژگی‌های رشدی و فتوسنتزی گوجه‌فرنگی مؤثر باشند.

واژه‌های کلیدی: عناصر مفید، تعرق، فتوسنتز

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mhaghghi@cc.iut.ac.ir

مقدمه

افزایش میزان تولید گیاهان به روش‌های مختلف مورد توجه کشاورزان می‌باشد. از جمله مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده رشد، تغذیه مناسب گیاه است (۲۲). تیتانیوم به‌عنوان یک عنصر سودمند باعث افزایش و تحریک رشد می‌شود (۱۹). کاربرد تیتانیوم در محلول غذایی و یا محلول‌پاشی روی برگ‌های گیاه باعث افزایش زیست‌توده و رشد گونه‌های مختلف گیاهی شده است (۳). اکسید تیتانیوم از طریق افزایش فتوسنتز و کاهش خسارت ناشی از آفات و بیماری‌ها تا ۳۰٪ باعث افزایش محصول شده است (۵). علاوه بر افزایش رشد، تیتانیوم باعث افزایش کیفیت محصولات نیز می‌گردد. طبق گزارش مارتینز سانچز و همکاران (۱۵) کاربرد تیتانیوم به‌صورت محلول‌پاشی روی برگ‌های فلفل باعث افزایش اسید اسکوربیک و کاپسانتین (مسئول ایجاد رنگیزه قرمز) در میوه فلفل شد (۱۷). تیتانیوم بر فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه نیز اثر دارد و باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، نیترات ردکتاز و پراکسیداز می‌شود. این محققین، دلیل افزایش فعالیت این آنزیم‌ها تحت تأثیر تیمار تیتانیوم را ناشی از افزایش جذب آهن دانستند (۱۷). رشد گیاه فلفل ناشی از افزایش طول بوته‌ها بود که تیتانیوم با افزایش جذب نیتروژن منجر به افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش طول بوته‌های فلفل شد. افزایش کیفیت فلفل و میزان قند آن در اثر افزایش کلروفیل ناشی از اعمال تیمار تیتانیوم نیز گزارش شده است (۱۷).

افزایش میزان محصول لویا چشم بلبلی تحت تیمار ۱۲۵ میلی‌لیتر در هکتار تیتانیوم توسط اولاد و همکاران (۱۸) گزارش شده است. این محققین، دلیل افزایش محصول لویا چشم بلبلی را نقش تیتانیوم در فعالیت نوری فتوسنتز دانستند. بنابراین، تیتانیوم با افزایش میزان کلروفیل (۳) و فتوسنتز، خصوصاً از طریق افزایش انتقال الکترون از فتوسیستم ۲ به ۱ (۲۰)، فعالیت نوری فتوسنتز (۱۸) و جذب عناصر مؤثر در تولید کلروفیل و فتوسنتز نظیر آهن (۴)، منیزیم (۴) و نیتروژن (۱۷)، باعث افزایش رشد می‌شود.

اثر سمیت تیتانیوم برای انسان گزارش نشده است. اما این عنصر برای رشد گیاه و باکتری‌ها در بعضی از غلظت‌ها سمی است و در غلظت‌های کم برای رشد گیاه مؤثر می‌باشد. اگرچه تحقیقات زیادی از ۸۰ سال قبل روی آثار مثبت تیتانیوم شروع شده، اما همچنان اثر آن بر بسیاری از گیاهان در شرایط مختلف و به دنبال آن بر جنبه‌های فیزیولوژیک گیاه، مجهول است (۱۳).

تولید ذرات نانو و کاربرد آنها در مباحث علمی در حال افزایش است و علی‌رغم تولید روزافزون آنها، بررسی‌های محدودی در خصوص اثر این مواد بر رشد گیاه وجود دارد. تأثیر مواد مختلف نانو بر جوانه‌زنی برخی بذرها بررسی شده است. لو و همکاران (۱۴) اثر مثبت نانوسیلیسم را بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه سویا گزارش کردند. هم‌چنین، نانوتیوب کربن به‌دلیل نفوذ بهتر به غشای بذر باعث افزایش جوانه‌زنی و رشد اولیه گوجه‌فرنگی شد (۱۱).

اثر ذرات نانوتیتانیوم بر جوانه‌زنی برخی از گیاهان و رشد درخت بید بررسی شده است. نانوذرات اکسید تیتانیوم بر رشد بید اثری نداشت، هرچند سریعاً توسط ریشه جذب شد (۲۱). اثر مثبت نانوتیتانیوم بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه اسفناج و متابولیسیم بهتر نیتروژن نیز گزارش شده است (۲۵). اما همچنان اطلاعات کافی در خصوص اثر و تغییرات فیزیولوژی ناشی از این عنصر مفید بر گیاهان مختلف محدود است.

نتایج آزمایش‌های محققین نشان داده که اثر کاربرد تیتانیوم روی برگ و رشد گیاه بسیار کمتر از زمانی است که تیتانیوم در محلول غذایی استفاده شود (۱۳). لذا آزمایش حاضر با در نظر گرفتن موارد ذکر شده و حذف اثرهای پیچیده خاک، در محیط هیدروپونیک طراحی شد تا تأثیر تیتانیوم در مقایسه با نانوتیتانیوم، بر رشد، فیزیولوژی و تغییرات فتوسنتزی در گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای بررسی شود. با توجه به اندازه کوچک‌تر ذرات نانو نسبت به شکل فلزی تیتانیوم، فرض بر این است که نانوتیتانیوم مؤثرتر از تیتانیوم بر رشد گیاه باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در شرایط محیطی کنترل شده گلخانه با میانگین دمای روز ۲۵ و دمای شب ۱۷ درجه سلسیوس، در گلخانه‌های دانشگاه صنعتی اصفهان (طول جغرافیایی ۲۸° ۵۱ شرقی، عرض جغرافیایی ۴۲° ۳۲ شمالی و ارتفاع متوسط ۱۶۲۴ متر از سطح دریا انجام) انجام شد. نشاهای گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum L.*) در مخلوطی از ورمیکولایت و پرلایت (۱:۲ حجمی) پرورش داده شدند. بعد از رسیدن گیاهان به مرحله ۴-۵ برگی، به محلول غذایی نیم غلظت و سپس کامل دارای سیستم هوادهی انتقال پیدا کردند. ترکیب محلول غذایی برحسب میلی‌گرم در لیتر به قرار زیر بود: نیتروژن=۷۰، فسفر=۵۰، پتاسیم=۱۲۰، کلسیم=۱۲۰، منیزیم=۵۰، آهن=۲/۸، منگنز=۰/۸، روی=۰/۳، بر=۰/۶ و مولیبدن=۰/۰۵. EC محلول غذایی 1.0 dS/m (۱۱). تیتانیوم و نانوتیتانیوم به صورت نمک اکسید تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات نانوتیتانیوم مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور خلوص نانوتیتانیوم، توسط پژوهشکده نانو تکنولوژی دانشگاه شیراز، نانوتیتانیوم سنتز شده با روش برگشت در محیط اسیدی تیمار شد و نانوتیتانیوم با خلوص نزدیک به ۹۹ درصد حاصل شد. جهت تهیه محلول یکنواخت نانوتیتانیوم با قطر ذرات ۸-۱۵ نانومتر و طول بیشتر از ۱۰ میکرومتر، از Ultrasonic sonication (10 MHz) در آب استفاده شد.

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار شامل تیمارهای: ۱) محلول غذایی شاهد، ۲) محلول غذایی + ۱ میلی‌گرم بر لیتر تیتانیوم، ۳) محلول غذایی + ۲ میلی‌گرم بر لیتر تیتانیوم، ۴) محلول غذایی + ۱ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم و ۵) محلول غذایی + ۲ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم بود. روزانه ۶ مرتبه هوارسانی، هر بار به مدت ۱۵ دقیقه انجام می‌شد. در صورت نیاز، محلول غذایی به ظروف اضافه می‌شد.

زمان ظهور اولین گل در طی آزمایش و پس از ۵ هفته، تعداد گل ثبت شد و قطر ساقه‌ها با استفاده از کولیس رقومی در

۱۵ سانتی‌متری بالای طوقه اندازه‌گیری شد. در پایان آزمایش، گیاهان برداشت شده و با آب شستشو گردیدند. ساقه‌ها و ریشه‌ها به وسیله تیغه استریل تیز از ۲ سانتی‌متری بالای طوقه از هم جدا شدند و حجم ریشه به روش حجمی اندازه‌گیری شد و پس از توزین ریشه و ساقه جهت تعیین وزن تر بافت‌های گیاهی در خشک کن با دمای ۷۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و وزن خشک ریشه و ساقه اندازه‌گیری شد.

میزان کلروفیل با استفاده از کلروفیل‌سنج (مدل CL-01 ساخت کشور انگلستان)، فاکتورهای فتوسنتزی شامل تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)، فتوستتز (میکرومول CO₂ بر مترمربع بر ثانیه) و دی‌اکسید کربن داخل روزنه‌ای (میکرومول بر مول) توسط فتوستتز متر (مدل LCi Prtable, photosynthesis system ساخت شرکت Bio scientific Ltd انگلستان) در هفته چهارم اندازه‌گیری شد.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری 8 Statestix و مقایسه میانگین‌ها با کمک آزمون LSD ($P < 0.05$) انجام گرفت.

نتایج

اثر سطوح مختلف تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر رشد

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲) نشان داد که با افزودن تیتانیوم و نانوتیتانیوم، تغییر معنی‌داری در حجم ریشه، وزن تر و خشک ساقه، قطر ساقه و زمان تا اولین گل‌دهی ایجاد نشد. اما تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر وزن تر و خشک ریشه اثر معنی‌داری داشتند. به طوری که با افزودن تیتانیوم و نانوتیتانیوم، وزن تر و خشک ریشه افزایش یافت و بیشترین میانگین وزن تر و خشک در تیمار یک میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم دیده شد که نسبت به شاهد به ترتیب ۴۰/۹۱ و ۲۷/۴۹ درصد افزایش نشان داد. در غلظت زیاد نانوتیتانیوم، وزن تر و خشک کاهش یافت. تعداد گل در ۱ میلی‌گرم بر لیتر تیتانیوم به حداقل رسید و به طور کلی تعداد گل با افزودن تیتانیوم و نانوتیتانیوم نسبت به محلول غذایی شاهد کاهش یافت؛ اگرچه این تفاوت معنی‌دار نبود (جدول ۲).

جدول ۱. خصوصیات نانو ذرات اکسید تیتانیوم

Nanostructures	اندازه ^۱ (nm)	درصد خلوص ^۲ (%)	سطح فعال (m ² /g) ^۳
Ti Nanoparticles	50-80	~98	940

^۱ اندازه‌گیری شده با electron microscopes SEM, AFM, and TEM
^۲ Evaluated by methods of TGA, ICP, etc. اندازه‌گیری شده با
^۳ Estimated by nitrogen adsorption isotherms اندازه‌گیری شده با

جدول ۲. اثر سطوح مختلف تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر رشد گوجه‌فرنگی

تیمار	زمان ظهور اولین گل	تعداد گل	قطر ساقه (میلی‌متر)	وزن تر ساقه (g/plant)	وزن تر ریشه (g/plant)	وزن خشک ساقه (g/plant)	وزن خشک ریشه (g/plant)	حجم ریشه (مترمکعب)
شاهد	۱۳/۲ a	۸/۰ a	۰/۶۱ a	۳۷/۵۸ a	۱۲/۶ bc	۳/۴۵ a	۰/۶۶ ab	۲۵/۳۳ a
۱ میلی‌گرم بر لیتر تیتانیوم	۱۰/۰ a	۴/۵۰ b	۰/۵۰ a	۴۰/۱۰ a	۱۶/۳۶ ab	۳/۳۸ a	۰/۵۶ b	۳۵/۳۳ a
۲ میلی‌گرم بر لیتر تیتانیوم	۶/۵ a	۵/۷۵ ab	۰/۵۵ a	۳۸/۷ a	۱۳/۵ abc	۳/۲۸ a	۰/۶۶ ab	۳۲/۰ a
۱ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم	۵/۶ a	۵/۶۶ ab	۰/۵۶ a	۳۷/۱۰ a	۱۷/۷۶ a	۴/۲۳ a	۰/۸۵ a	۳۹/۶۶ a
۲ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم	۷/۷ a	۶/۲۵ ab	۰/۵۳ a	۳۱/۴۱ a	۱۱/۰۰ c	۳/۱۴ a	۰/۵۶ b	۲۷/۶۶ a

†: در هر ستون، حروف یکسان سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD نشان می‌دهند.

اثر سطوح مختلف تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر تغییرات

فتوستتزی

نتایج جدول ۳ نشان داد که با افزودن تیتانیوم و نانوتیتانیوم به محلول غذایی، میزان کلروفیل تغییر معنی‌داری نداشت. درحالی‌که میزان فتوستتزی، تعرق و دی‌اکسید کربن داخل روزنه‌ای تغییرات معنی‌داری نشان داد. به این شکل که بیشترین فتوستتزی و تعرق در ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوتیتانیوم به‌ترتیب ۶۰/۴۱ و ۳۶/۶۶ درصد افزایش داشت. اثر مثبت نانوتیتانیوم در مقایسه با تیتانیوم بر تعرق بارزتر از فتوستتزی بود و بیشترین میزان دی‌اکسید کربن داخل روزنه‌ای در تیمار یک میلی‌گرم در لیتر تیتانیوم مشاهده شد. اما در سایر غلظت‌های تیتانیوم و نانوتیتانیوم کاهش یافت.

بحث

تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر ریشه مؤثرتر از ساقه یا قسمت هوایی بودند. تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر وزن تر و خشک ریشه اثرهای مشابهی داشتند و هر دو باعث افزایش و بهبود وزن تر و خشک ریشه شدند. بیشترین میزان هر دو در تیمار ۱ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم دیده شد. نتایج تحقیقات روی گیاه سویا نشان داده که حرکت تیتانیوم بسیار کند است و در اندامی که تحت تیمار قرار می‌گیرد مؤثرتر است (۱۴). لذا در این آزمایش، اعمال تیمار تیتانیوم در محلول غذایی و محیط ریشه باعث تحریک رشد ریشه بیش از قسمت هوایی شد. از طرفی، تیتانیوم از طریق کاهش اثرهای سمی عناصر دیگر باعث افزایش رشد ریشه می‌شود (۹). در این آزمایش دیده شد که نانوتیتانیوم بر

جدول ۳. اثر سطوح مختلف تیتانیوم و نانوتیتانیوم بر تغییرات فتوسنتزی گوجه‌فرنگی

تیمار	دی‌اکسید کربن داخل سلولی (میکرومول بر مول)	تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)	نرخ فتوسنتز (میکرومول CO ₂ بر مترمربع بر ثانیه)	محتوای کلروفیل (عدد اسپاد)
شاهد	† ۱۳۶/۰ b	۰/۱۵ b	۰/۲۴ b	۲۰/۷۹ a
۱ میلی گرم بر لیتر تیتانیوم	۴۹۱/۵۰ a	۰/۱۹ ab	۰/۳۰ b	۲۳/۴۲ a
۲ میلی گرم بر لیتر تیتانیوم	۲۲۸/۳۳ b	۰/۱۷ ab	۰/۲۱۲ b	۲۳/۳۲ a
۱ میلی گرم بر لیتر نانوتیتانیوم	۳۰۳/۵۰ b	۰/۲۰ a	۰/۲۱۵ b	۲۱/۳۶ a
۲ میلی گرم بر لیتر نانوتیتانیوم	۲۵۱/۵۰ b	۰/۲۰ a	۰/۳۸ a	۲۰/۸۹ a

†: در هر ستون، حروف یکسان سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD نشان می‌دهند.

اثری بر رشد نداشت. از طرفی، نتایج تحقیقات نشان داده است که نحوه اعمال تیتانیوم بر رشد به‌طور متفاوتی اثر دارد. هرچند این نتایج روند مشابهی ندارند، اما کازل و همکاران (۱۳) بیان کردند که اعمال تیتانیوم در محلول غذایی بر رشد مؤثرتر از تیمار آن بر برگ بود و مارتینز سانچز و همکاران (۱۶) نشان دادند که محلول‌پاشی این عنصر روی برگ‌های فلفل اثر بیشتری بر رشد داشت. آزمایش حاضر نشان داد که اعمال تیتانیوم در محلول غذایی بر رشد گوجه‌فرنگی آثار مثبتی نداشت که تأییدی بر نتایج مارتینز سانچز و همکاران (۱۶) بود. قابل ذکر است که انجام آزمایش‌های تکمیلی جهت تعیین اثر تیتانیوم بر رشد گوجه‌فرنگی به روش محلول‌پاشی و تعیین بهترین روش کاربرد آن ضروری است.

در این آزمایش دیده شد که تفاوتی بین اندازه ذرات (تیتانیوم و نانوتیتانیوم) و غلظت تیتانیوم (۱ و ۲ میلی گرم در لیتر) در تحریک رشد ساقه وجود ندارد. به نظر می‌رسد که میزان حرکت ذرات نانو و فرم فلزی تیتانیوم در گیاه تفاوتی ندارد. با توجه به این‌که ثابت شده است حرکت تیتانیوم بسیار کند است (۱۳)، نتایج اندازه‌گیری غلظت تیتانیوم در قسمت هوایی گیاه مؤید این مطلب است که حتی با افزایش غلظت تیتانیوم، میزان انتقال آن به ساقه تغییری نکرد (داده‌ها نشان داده نشده است).

تاکنون اثر تیتانیوم بر رشد زایشی گیاه بررسی نشده است. در گوجه‌فرنگی مشاهده شد که تیتانیوم بر زمان ظهور اولین گل و ورود گیاه به فاز زایشی اثری ندارد. اما تعداد گل را در

رشد ریشه مؤثرتر از تیتانیوم بود. به‌طوری‌که در غلظت کمتر نانوتیتانیوم (۱ میلی گرم بر لیتر) اثر مؤثرتری از هر دو غلظت تیتانیوم داشت و در غلظت‌های زیاده‌تر، نانوتیتانیوم اثر سمیت نشان داد. دلیل احتمالی آن به اندازه ذرات نانو و امکان نفوذ بیشتر و مؤثرتر این ذرات در مقایسه با شکل فلزی این عنصر مربوط می‌شود. اگرچه تاکنون گزارشی مبنی بر آثار سمی نانوتیتانیوم ارائه نشده است و آزمایش سیگر و همکاران (۲۱) روی بید نیز چنین چیزی را نشان نداد، اما ماهیت متفاوت ریشه و اندازه ذرات نانو دلیل این اختلاف است. به‌طوری‌که بید به‌عنوان گیاه چوبی با ریشه‌های ضخیم‌تر و گوجه‌فرنگی به‌عنوان گیاه علفی با ریشه‌های پراکنده و ظریف‌تر و اندازه متفاوت ذرات نانو در آزمایش حاضر (۵۰-۸۰ nm) و در آزمایش سیگر و همکاران (۱۰۰ nm) عامل احتمالی این اختلاف است. باید در نظر داشت که اثر سمیت در گیاهان چوبی پس از طولانی مدت بروز می‌کند (۲۱)، درحالی‌که در گیاهان علفی این اثر سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

اگرچه گزارش‌هایی مبنی بر اثر مثبت تیتانیوم بر رشد گیاهانی مانند برنج (۲)، لوبیا چشم بلبلی (۱۸) و سیب (۲۴) وجود دارد، اما نتایج این آزمایش چنین اثر مثبتی را نشان نداد. دلیل احتمالی آن توسط وجسیک و کلامکوسکی (۲۳) توجیه شده است. آنها مشاهده کردند زمانی که تیتانیوم در شرایط غذایی بهینه روی گیاه سیب اعمال می‌شد اثری بر رشد نداشت. اما تیتانیوم در شرایط غیربهینه غذایی بر رشد مؤثر بود. از آنجایی‌که در این آزمایش نیز تیتانیوم در شرایط بهینه غذایی (محلول غذایی کامل) اعمال شد،

نشد. به نظر می‌رسد افزایش فتوستتزر در این غلظت مربوط به فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوستتزر باشد. گزارشی مبنی بر اثر تیتانیوم بر تعرق و فتوستتزر داخل روزنه‌ای موجود نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، استفاده از تیتانیوم و نانوتیتانیوم در شرایط آبکشت گوجه‌فرنگی باعث تحریک رشد ریشه و فتوستتزر در گیاه شد. اگرچه به نظر می‌رسد که غلظت‌های بیشتر تیتانیوم می‌تواند اثرهای مثبت‌تری نشان دهد. اثر تیتانیوم بر فتوستتزر نه از طریق افزایش کلروفیل، بلکه از طریق اثرهای غیرمستقیمی ایجاد شد که تیتانیوم بر جذب سایر عناصر و آنزیم‌های دخیل در فعالیت‌های فتوستتتری داشت.

اثرهای مثبت یا سمیت نانوتیتانیوم بر رشد گوجه‌فرنگی برای اولین بار در این آزمایش بررسی شد. نتایج، عدم تأثیر منفی بر رشد گیاه، به‌جز وزن تر ریشه در غلظت‌های زیاد آن، و تأثیر مثبت آن بر فتوستتزر و تعرق را تا غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر، نشان داد.

غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر کاهش داد و در غلظت دیگر آن و همچنین نانوتیتانیوم بر تعداد گل بی‌اثر بود. دلایل فیزیولوژیک نحوه تأثیر این عنصر بر این خصوصیت مشخص نیست و نیازمند انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

تیتانیوم در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر بر میزان دی‌اکسیدکربن داخل سلولی روزنه و فتوستتزر مؤثر بود. نانوتیتانیوم در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌گرم بر لیتر بر تعرق و در غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر بر فتوستتزر مؤثر بود و حتی در غلظت کمتر و در هر دو فرم فلزی و نانو باعث افزایش تعرق شد. اما این افزایش در فتوستتزر فقط در غلظت زیاد نانوتیتانیوم دیده شد. تیتانیوم از دو طریق باعث افزایش فتوستتزر می‌شود: یکی از طریق تغییر در فعالیت پروتئین‌های دخیل در فتوستتزر، از جمله فروکتوز ۱-۶ بی‌فسفاتاز که در چرخه کلوین مؤثر است و آنزیم‌های لکوگونوژناز و تغییر در چرخه پنتوز فسفات اکسیداز که در متابولیسم کربوهیدرات نقش دارد، و دوم از طریق افزایش کلروفیل که باعث تحریک و افزایش فتوستتزر می‌شود (۶ و ۱۲). در آزمایش حاضر، تیتانیوم تأثیر معنی‌داری بر کلروفیل نداشت و به دنبال آن تغییرات مشهودی نیز در فتوستتزر، به‌جز در غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر نانوتیتانیوم، دیده

منابع مورد استفاده

- Alcaraz-Lopez, C., M. Botía, C. F. Alcaraz and F. Riquelme. 2004. Effects of calcium-containing foliar sprays combined with titanium and algae extract on plum fruit quality. *J. Plant Nutr.* 27(4): 713-729.
- Anonymous. 2002. Method of Accelerating Metabolism and Growth of Plant Using the Corpuscular of Titanium Dioxide. Sun Plus Corp., A Handbook, pp. 1-31.
- Carvajal, M. and C. F. Alcaraz. 1998. Why titanium is a beneficial element for plants. *J. Plant Nutr.* 21(4): 655-664.
- Carvajal, M., F. Martínez-Sánchez and C. F. Alcaraz. 1994. Effect of Ti(IV) on some physiological activity indicators of *Capsicum annuum* L. plants. *Hort. Sci.* 69: 427-432.
- Chao, S. H. L. and H. S. Choi. 2005. Method for Providing Enhanced Photosynthesis. Korea Research Institute of Chemical Technology, Jeonju, South Korea, 10 p.
- Daood, H. G., P. Biacs, M. Feher, F. Hajdu and I. Pais. 1988. Effect of titanium on the activity of lipooxygenase. *J. Plant Nutr.* 11: 505-516.
- Giménez, J. L., F. Martínez-Sánchez, J. L. Moreno, J. L. Fuentes and C. F. Alcaraz. 1990. Titanium in plant nutrition. III. Effect of Ti(IV) on yield of *Capsicum annuum* L. PP. 123-128. In: Barcelo, J. (Ed.), *Nutricion Mineral bajo Condiciones de Estres*, SPIC-UIB, Palma de Mallorca.
- Hara, T., Y. Sonoda and I. Iwai. 1976. Growth responses of cabbage plants to transition elements under water culture conditions. I. Titanium, vanadium, chromium, manganese, and iron. *Soil Sci. Plant Nutr.* 22: 307-315.
- Inman, O. L., G. Barclay and M. Hubbard. 1935. Effect of titanium chloride on the formation of chlorophyll in *Zea mays*. *J. Plant Physiol.* 10: 821-822.
- Jones, J. B. 1930. *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. 2nd Ed., CRC Press, USA, 439 p.

11. Khodakovskaya, M., E. Dervishi, M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li, F. Watanabe and A. S. Biris. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano* 3: 3221-3227.
12. Kiss, F., G. Deak, M. Feher, A. Balogh, L. Szabolsci and I. Pais. 1985. The effect of titanium and gallium in photosynthetic rate of algae. *J. Plant Nutr.* 8: 825-832.
13. Kuzel, S., M. Hruby, P. Cigler, P. Tlustos and P. N. Van. 2003. Mechanism of physiological effects of titanium leaf sprays on plants grown on soil. *J. Biol. Trace Elem. Res.* 91(2): 179-190.
14. Lu, C. M., C. Y. Zhang, J. Q. Wen, G. R. Wu and M. X. Tao. 2002. Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. *Soybean Sci.* 21: 168-172.
15. Martínez-Sánchez, F., J. L. Giménez, M. A. Martínez-Cañadas, J. J. Pastor and C. F. Alcaraz. 1990. Micronutrient composition in several portions of *Capsicum* plants and their relation with red fruit color. *Acta Aliment.* 19: 177-185.
16. Martínez-Sánchez, F., M. Carvajal, M. J. Frutos, J. L. Giménez, and C. F. Alcaraz. 1991. Titanium in the nutrition of *Capsicum annuum* L. plants. *Ciencia Agronómica* 11: 73-78.
17. Martínez-Sánchez, F., M. Nunez, A. Amoros, J. L. Gimenez and C. F. Alcaraz. 1993. Effect of titanium leaf spray treatments on ascorbic acid levels of *Capsicum annuum* L. fruits. *J. Plant Nutr.* 16(5): 975-981.
18. Owolade, O. F., D. O. Ogunlet and M. O. Adenekan. 2008. Titanium dioxide affects diseases, development and yield of edible cowpea. *J. Environ. Agric. Food Chem.* 7(5): 2942-2947.
19. Pais, I. 1983. The biological importance of titanium. *J. Plant Nutr.* 6(1): 3-131.
20. Ram, N., M. Verloo and A. Cottenie. 1983. Response of bean (*Phaseolus vulgaris*) to foliar spray of titanium. *J. Plant Soil* 73: 285-290.
21. Seeger, E. M., A. Baun, M. Kästner and S. Trapp. 2008. Insignificant acute toxicity of TiO₂ nanoparticles to willow trees. *J. Soils Sedim.* 9(1): 46-53.
22. Simon, L., F. Hajdu, A. Balogh and I. Pais. 1988. Effect of titanium on growth and photosynthetic pigment composition of *Chlorella pyrenoidosa* (green alga). II. Effect of titanium ascorbate on pigment content and chlorophyll metabolism of chlorella. PP. 87-101. In: Pais, I. (Ed.), *New Results in the Research of Hardly Known Trace Elements and Their Role in the Food Chain*. University of Horticultural and Food Science, Budapest, Hungary.
23. Wojcik, P. and K. Klamkowski. 2004. "Szampion" apple tree response to foliar titanium application. *J. Plant Nutr.* 27(11): 2033-2046.
24. Wojcik, P. and M. Wojcik. 2001. Growth and nutrition of M.26 EMLA apple rootstock as influenced by titanium fertilization. *J. Plant Nutr.* 24(10): 1575-1588.
25. Yang, F, F. Hong, W. You, C. Liu, F. Gao, C. Wu and P. Yang. 2006. Influences of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach. *J. Biol. Trace Elem. Res.* 110(2): 179-190.