شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران

دانشگاه زنجان، ۵ تا ۷ شهریور ۱۳۹۸

محور مقاله: حاصلخیزی خاک، تغذیه گیاه و کشت گلخانه‌ای

اثر مقادیر و منابع مختلف سیلیسیم بر توسعه ریشه و جذب فسفر

سمیه صابریان رنجبر [۱*]، بابک متشرع زاده [۲]، فرهاد مشیری [۳]، حسینعلی علیخانی [۴]

[۱] دانش آموخته دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

[۲] دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

[۳] استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

[۴] استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

چکیده

افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها با تغذیه بهینه سیلیسیم می‌تواند منجر به افزایش سطح کل جذب‌کننده عناصر شود. از این رو پژوهشی با هدف بررسی اثر سطوح مختلف سیلیکات پتاسیم و نانوذرات سیلیس بر خصوصیات ریشه از جمله وزن، حجم، طول و مساحت آن در ارتباط با سهولت جذب فسفر در گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران انجام گرفت. این پژوهش در قالب طرح کاملا تصادفی و به صورت فاکتوریل، با دو فاکتور شامل سیلیسیم در شش سطح (شاهد، سیلیکات پتاسیم با سطح کاربرد۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و نانوذرات سیلیس با سطح کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و هفت رقم گندم (گنبد، شیرودی، شیراز، مهدوی، مرودشت، بهار و پارسی) در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیم موجب تحریک رشد شد به‌طوری که افزودن سطوح بهینه سیلیکات پتاسیم و نانوذرات سیلیس توانست زیست توده ریشه را به‌ترتیب ۶/۱۷ و ۲۱/۰ درصد افزایش دهد. همچنین بهبود سایر ویژگی‌های ظاهری ریشه با کاربرد سیلیسیم مشاهده شد. نتایج همچنان بیان‌گر افزایش فراهمی و جذب فسفر توسط ریشه گیاه در حضور سیلیسیم بود. کاربرد سطوح مناسب سیلیسیم توانست غلظت فسفر ریشه را تا حدود ۴۵ درصد افزایش دهد.

کلمات کلیدی: زیست‌توده ریشه، سیلیکات پتاسیم، نانوذرات سیلیس، عناصر غذایی

مقدمه

ریشه‌ها اندام مهمی در جذب آب و عناصرغذایی می‌باشند از این‌رو زیست‌توده آنها حاصل بسیاری از عوامل اکولوژیکی و کشاورزی بوده و بازتابی از حاصلخیزی خاک زیرین آنها می‌باشد (Gao et al., 2004). جذب عناصر غذایی با خصوصیات ریشه از جمله سطح و طول آن مرتبط بوده لذا گسترش ریشه در عمق و سطح می‌تواند با فراهم نمودن مکان‌های بیشتر برای جذب یون‌های قابل‌انتشار، رشد و نمو گیاه را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد. (Barber, 1984). با استناد به نتایج برخی تحقیقات، تغذیه بهینه سیلیسیم با افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌تواند منجر به افزایش سطح کل جذب کننده عناصر شود (Sun et al., 2005) چنان‌که بیان شد اثر محرک سیلیسیم بر رشد ریشه ممکن است به دلیل افزایش کشیدگی ریشه در اثر افزایش اتساع دیواره سلولی در منطقه رشد باشد (Hattori et al., 2003). اگرچه برخی دیگر چنین اظهار داشتند که کاربرد سیلیسیم موجب تحریک رشد ریشه نشده‌است و افزایش کارایی و جذب آب را دلیل افزایش جذب عناصرغذایی دانستند (Sonobe et al., 2010). با این‌حال می‌توان دلیل افزایش جذب آب ضمن کاربرد سیلیسیم را نیز بهبود هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها (Hattori et al., 2008) و یا فعالیت ریشه (Chen et al., 2011) دانست.

سیلیسیم باعث افزایش تحرک فسفر در خاک می‌شود، چنان‌که اثر مفید سیلیسیم در شرایط کمبود فسفر در بسیاری از گیاهان مثل برنج و جو گزارش شده است (Marschner, 1995). با توجه به رقابت آنیون‌های معمول در جذب سطحی، سیلیسیم می‌تواند سبب آزاد سازی فسفات شود و بدین ترتیب تحرک و قابلیت استفاده فسفر برای گیاهان افزایش می‌یابد. طی پژوهشی که تحت شرایط کمبود فسفر صورت گرفت در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم افزایش رشد مشاهده شد. لذا اضافه کردن سیلیسیم به محلول غذایی می‌تواند با تغییر و تعدیل در فعالیت ریشه (Ma and Takahashi, 1990) موجب افزایش جذب فسفر شود (Wang et al., 2001). با این‌حال تحقیقات بیشتری جهت تعیین چگونگی اثر سیلیسیم بر خصوصیات آناتومیکی ریشه و همچنین تنظیم جذب فسفر مورد نیاز است تا بتوان رشد بهبود یافته گیاه توسط سیلیسیم را بهتر درک نماییم.

* ایمیل نویسنده مسئول: saberian@ut.ac.ir

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر، به‌صورت فاکتوریل در قالب کاملا تصادفی با دو فاکتور و در سه تکرار به‌منظور بررسی اثر منابع مختلف سیلیسیم بر جذب و انباشت سیلیسیم توسط هفت رقم گندم ایرانی در شرایط گلخانه ای اجراء گردید. تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل هفت رقم گندم (گنبد، شیرودی، شیراز، مهدوی، مرودشت، بهار و پارسی) و شش سطح سیلیسیم (شاهد، سیلیکات‌پتاسیم با سطح کاربرد۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و نانوسیلیس با سطح کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود.

خاک مورد نیاز برای کشت گلخانه‌ای از مزرعه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج نمونه‌برداری شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک موردنظر مشخص گردیده‌است. تیمارهای سیلیسیم هشت هفته قبل از کاشت جهت گذراندن چند دوره خشک و مرطوب شدن به گلدان‌ها اعمال شد و تفاوت پتاسیم اضافه شده از طریق سیلیکات‌پتاسیم محاسبه و توسط سولفات‌پتاسیم تعدیل گردید. بذر ارقام گندم از موسسه تحقیقات اصلاح بذر و نهال کرج تهیه گردید. برداشت گیاه پس از گذشت ۸ هفته از جوانه‌زنی، در پایان دوره رویشی و قبل از ورود به دوره زایشی انجام شد. ریشه گیاهان با دقت از گلدان خارج و به‌وسیله شستشو با آب به‌آرامی از خاک جدا و سپس با آب مقطر شسته شدند و جهت اندازه‌گیری وزن خشک ریشه در پاکت کاغذی قرار داده شد و سپس در آون تهویه‌دار با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و جهت انجام تجزیه شیمیایی آسیاب گردید. حجم ریشه از روی جابه‌جا شدن آب پس از غوطه‌ور ساختن ریشه‌ها در آب توسط یک استوانه مدرج بر حسب میلی‌متر محاسبه گردید، طول ریشه و سطح ریشه نیز به صورت تجربی و از روش اتکینسون و با استفاده از رابطه زیر برآورد گردید (علیزاده، ۱۳۷۸).

رابطه (۱)
$$\text{ریشه طول} = \text{خشک وزن} \times 0.89$$

رابطه (۲)
$$\text{سطح ریشه} = \sqrt{\left(\pi \times \text{ریشه طول} \times \text{ریشه حجم}\right)}$$

تجزیه شیمیایی گیاه به روش اکسیداسیون خشک با استفاده از کوره الکتریکی و سپس هضم در اسیدکلریدریک انجام شد. غلظت فسفر در عصاره حاصل نیز به روش آمونیوم مولیبدات وانادات بوسیله دستگاه اسپکتروفتومتری مدل Schimadzo UV- 3100 در طول موج ۴۳۰ نانومتر تعیین گردید (Rayan et al., 2001).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به تمامی صفات مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده‌است. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که هر سه اثر کاربرد سیلیسیم در سطوح و منابع مختلف، رقم گندم و اثر متقابل آن‌ها بر وزن خشک، طول، حجم و سطح ریشه و همچنین غلظت فسفر ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر سطوح سیلیسیم و ارقام گندم بر صفات مورد بررسی در ریشه

منابع دگرگونی	درجه آزادی	وزن خشک	طول	حجم	سطح	غلظت فسفر
سیلیسیم سطوح	۵	۰/۱۱۳**	۰/۰۹**	۲۰/۱**	۳/۰۳**	۰/۰۱۱**
رقم گندم	۶	۰/۸۰۴**	۰/۶۴۴**	۴۶/۵**	۱۶/۷**	۰/۰۲۷**
رقم گندم× سطوح سیلیسیم	۳۰	۰/۱۴۰**	۰/۱۱**	۷/۱**	۲/۵**	۰/۰۰۲**
خطا	۸۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۲/۰۴	۰/۵۲	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات	-	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۳/۷	۱۸/۷	۹/۹۰

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns غیر معنی‌دار

جدول ۲- اثر منبع تأمین سیلیسیم بر صفات مورد بررسی در ریشه

	شاهد	سیلیکات پتاسیم ۲۰۰(ppm)	سیلیکات پتاسیم ۴۰۰(ppm)	سیلیکات پتاسیم ۱۰۰۰(ppm)	نانو سیلیس ۵۰(ppm)	نانو سیلیس ۱۰۰(ppm)
وزن خشک (گرم)	۰/۸۱^{B}	۰/۸۴^{B}	۰/۸۶^{AB}	۰/۹۸^{A}	۰/۸۶^{AB}	۰/۹۸^{A}
طول (متر)	۰/۷۳^{B}	۰/۷۵^{B}	۰/۷۷^{AB}	۰/۸۸^{A}	۰/۷۷^{AB}	۰/۸۷^{A}
حجم(سانتی‌متر مکعب)	۵/۲۴^{CD}	۴/۸۱^{D}	۶/۲۱^{B}	۶/۲۱^{B}	۶/۱^{BC}	۷/۶۵^{A}
سطح(سانتی‌متر مربع)	۴/۱۷^{BC}	۳/۷۶^{C}	۵/۵۲^{AB}	۶/۱۳^{A}	۶/۱۲^{A}	۶/۰۷^{A}
غلظت فسفر (درصد)	۰/۱۳^{E}	۰/۱۳^{E}	۰/۱۴^{D}	۰/۱۹^{A}	۰/۱۷^{B}	۰/۱۶^{C}

حروف انگلیسی در جدول نشان‌دهنده‌ی اثر سیلیسیم در سطح ۵ درصد می‌باشند.

نتایج مقایسه اثر کاربرد سیلیکات پتاسیم و نانوذرات سیلیس بر میانگین مربوط به وزن خشک، طول، حجم و سطح ریشه و همچنین غلظت فسفر ریشه در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به نتایج موجود در این جدول، بالاترین سطوح سیلیکات‌پتاسیم و نانوذره سیلیس باعث توسعه ریشه از طریق افزایش میانگین مربوط به وزن خشک، طول، حجم و سطح ریشه گردید، چنان‌که کاربرد سطح ۱۰۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک از منبع سیلیکات‌پتاسیم توانست میانگین مربوط به وزن خشک، طول، حجم و سطح ریشه به‌ترتیب به میزان ۶/۱۷، ۵/۴۷، ۱۸/۵ و ۴۷/۰ درصد نسبت به گیاهانی که سیلیسیم دریافت نکرده بودند افزایش دهد. همچنین میزان افزایش به‌ترتیب ۲۱/۰، ۱۹/۲، ۱۶/۴ و ۴۵/۵ درصدی صفات فوق در صورت افزودن نانوذرات سیلیس درسطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. بررسی نتایج به‌دست آمده از این پژوهش همچنان اثر چشم‌گیر کاربرد نانوذرات را در برابر سیلیکات پتاسیم متذکر می‌شود که کارایی بالای این ذرات را می‌توان مرتبط با اثر بی‌نظیر آنها مانند نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی دانست. مرفولوژی و معماری ریشه عامل مهمی در جذب کارآمد عناصرغذایی و همچنین آماده‌سازی گیاهان به شرایط کمبود آب و موادغذایی در خاک می‌باشد. محققین تغییرات مرفولوژی ریشه را مرتبط با افزایش حجم خاک در دسترس ریشه یا افزایش سطوح جذب‌کننده، افزایش ترشحات ریشه‌ای و همچنین افزایش وزن یا طول ریشه دانسته و آن‌را باعث افزایش جذب عناصرغذایی و بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه عنوان کردند (Ma and Yamaji, 2006; Mann, 2006). اگرچه اثر سیلیسیم بر رشد ریشه همچنان مورد بحث است و اثرات متفاوتی از کاربرد سیلیسیم بر رشد ریشه مشاهده شده است، با این‌حال گزارشاتی مبنی بر اثر مثبت تغذیه سیلیسیم بر توسعه ریشه ارائه شده است (Zhu et al., 2004; Mali and Aery, 2009; Dehghanipoodeh et al., 2016).

روند تغییرات غلظت فسفر در ریشه نیز با افزایش سطح کاربرد سیلیسیم تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک از منبع سیلیکات‌پتاسیم نسبت به سطوح پایین‌تر و عدم کاربرد آن نشان‌دهنده افزایش به میزان ۴۷/۰ درصد بود. گزارش ایستگاه تحقیقاتی رتامستد در مورد روابط بین کاربرد سیلیسیم و جذب فسفر نشان داد که افزودن سیلیسیم عملکرد را در گلدان‌هایی که فسفر دریافت نکرده بودند افزایش داد، این مسئله نشان داد که سیلیسیم ممکن است فراهمی فسفر را افزایش دهد (Rothamsted, 2013) و علت احتمالی آن‌را افزایش فعالیت‌های ریشه تحریک شده با سیلیسیم در اثر افزایش فعالیت دهیدروژناز ریشه و همچنین رقابت بین آنیون فسفات و سیلیکات در محل‌های جذب و تبادل عنوان کردند. Eneji و همکاران (۲۰۰۸) نیز با توجه به همبستگی منطقی بین سیلیسیم و جذب فسفر پیشنهاد نمودند که سیلیسیم علت افزایش غلظت فسفر محلول در خاک می-

باشد. بنا بر نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده شد که اگرچه کاربرد نانوذرات سیلیس نسبت به گیاهانی که سیلیسیم دریافت نکرده بودند توانست غلظت فسفر ریشه را به میزان حدود ۲۷ درصد افزایش دهد با این حال کارایی این نانوذره در سهولت جذب فسفر توسط ریشه کمتر از سیلیکات پتاسیم بود. به نظر می‌رسد کـه نانو ذرات سیلیس به دلیل اندازه بسیار کوچک خود و همچنین به دلیل نیروی هماوری زیاد، در سلول‌های آندودرمی ریشه‌ها رسوب کرده که این امر باعث مسدود شدن و تشکیل موانع آپوپلاستی در برابر حرکت شعاعی فسفر در عرض ریشه‌ها می‌شود. بنابراین رسـوب نانوذرات سیلیس در سـلول‌هـای آندودرمی ریشه‌ها و یا کاهش تعرق ناشی از سیلیسیم می‌تواننـد از عوامل کاهش جذب فسفر توسـط گیاهـان باشند (Ma, 2004).

نتیجه‌گیری

توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه و چگونگی وضعیت عناصر غذایی خاک در بررسی راهبردهای موثر بر توسعه و بهبود حاصلخیزی خاک و تعیین اثر آنها در محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر مبنای نتایج این پژوهش، تأثیر مثبت کاربرد سیلیسیم بر خصوصیات مرفولوژیک و تولید زیست توده ریشه نشان داده شد. این نتایج بیانگر افزایش معنی‌دار این صفات در شرایط بهره‌گیری از نانوذرات سیلیس نسبت به سیلیکات پتاسیم بود. با توجه به این نتایج همچنین شاهد افزایش ۴۷/۰ درصدی غلظت فسفر ریشه در گیاهان تیمار شده با بالاترین سطح سیلیکات پتاسیم بودیم، اگرچه نانوذرات سیلیس نیز باعث افزایش غلظت فسفر در ریشه شدند اما در برابر سیلیکات پتاسیم از موفقیت کمتری برخوردار بودند. از آنجا که فسفر کم‌تحرک‌ترین و غیرقابل‌جذب‌ترین عنصر غذایی در خاک می‌باشد و با عنایت به نقش دو عامل مهم سطح ریشه و تغییرات حاصل از فعالیت ریشه‌ها بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی، آگاهی از تغییرات فراهمی فسفر در محیط رشد ریشه می‌تواند به درک رفتار سیلیسیم در خاک و اثر آن بر سهولت جذب فسفر کمک کند.

منابع

علیزاده، ا. ۱۳۸۵. رابطه آب و خاک و گیاه. آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا (ع)، ۴۸۴ صفحه.

Barber, SA. 1984. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Wiley-Interscience, New York.

Chen, W., Yao, XQ., Cai, KZ. and Chen, J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research. 142, 67–76.

Dehghanipoodeh, S., Ghobadi, C., Baninasab, B., Gheysari, M. and Bidabadi, SS. 2016. Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (fragaria× ananassa cv.'camarosa'). Journal of Plant Nutrition. 39(4), 502-507.

Eneji, AE., Inanaga, S., Muranaka, S., Li, J., Hattori, T., An, P. and Tsuji, W. 2008. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. Journal of Plant Nutrition. 31, 355–365.

Gao, X., Zou, C., Wang, L. and Zhang, F. 2004. Silicon improves water use efficiency in maize plants. Journal of Plant Nutrition. 27 (8), 1457–1470.

Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxova, M. and Sugimoto, Y. 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. Plant and Cell Physiology. 44, 743–9.

Hattori, T., Sonobe, K., Inanaga, S., An, P. and Morita, S. 2008. Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress. Journal of Plant Nutrition. 31, 1046–1058.

Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. Soil Science and Plant Nutrition. 50, 11–18.

Ma, J.F. and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in Plant Science. 11, 392–397.

Ma, JF. And Takahashi, E. 1990. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. Plant and Soil. 126, 115–119.

Mali, M. and Aery, N. 2009. Effect of silicon on growth, biochemical constituents, and mineral nutrition of cowpea. Communications in soil science and plant analysis. 40(7-8), 1041-1052.

Mann, S. 2006. Report on Nanotechnology and Construction. Institute of Nanotechnology European Nanotechnology. Gateway. available online at: http://www.nanoforum.org.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press.

Rayan, J., Estefan, G. and Rashid, A. 2001. Soil and plant analysis laboratory manual. Second edition. Available from ICARDA, Aleppo, Syria. X+172.

Rothamsted Research. 2013. Rothamsted research's classical experiment “Hoos barley—started in 1852”. http://www.rothamsted.ac.uk/ Content- Section=Resources&Page=ClassicalExperiments.html. accessed 19 September 2013.

Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A.E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., Inanaga, S. 2010. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. Journal of Plant Nutrition. 34(1), 71-82.

Sun, C. W., Y. C. Liang and V. Romheld. 2005. Effects of foliar- and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildow in cucumissativus. J. Plant Pathol. 54: 678-685.

Wang, G., Dobermann, A., Witt, C., Sun, Q., Fu, R. 2001. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. Agronomy Journal. 93(4), 869-878.

Zhu, ZJ., Wei, GQ., Li, J., Qian, QQ. and Yu, JP. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (Cucumis sativus L.). Plant Science. 167, 527–33.

16th Iranian Soil Science Congress

University of Zanjan, Iran, August 27-29, 2019

Topic for submission: Soil Fertility, Plant Nutrition and Greenhouse Cultivation

The effect of different amounts and sources of silicon on root development and phosphorus uptake

Saberian Ranjbar [*1], S., Motesharezadeh [2], B., Moshiri, F.[3] Alikhani, H.A.[4]

[1] PhD graduated, Soil Science Department University of Tehran
[2] Associate Prof., Soil Science Department University of Tehran
[3] Assistant prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Extension and Education Organization
[4] Professor, Soil Science Department University of Tehran

Abstract

Increasing the growth and development of volumetric and weighing roots by optimally feeding silicon can lead to an increase in total uptake levels of the elements. Therefore, a research was conducted to investigate the effect of different levels of potassium silicate and silica nanoparticles on root characteristics including weight, volume, length and area in relation to the facility of phosphorus uptake in the research greenhouse of the Department of Soil Science Engineering, University of Tehran. This study was conducted in a completely randomized design with a factorial arrangement with two factors including silicon in six levels (control, potassium silicate with application levels of 200, 400 and 1000 mg/kg soil and silica nanoparticles with application levels of 50 and 100 mg/kg soil), and seven wheat cultivars (Gonbad, Shirodi, Shiraz, Mahdavi, Marvdasht, Bahar and Parsi) were carried out in three replications. The results showed that the application of silicon stimulated growth, so that the addition of optimal levels of potassium silicate and silica nanoparticles could increase the biomass of root 6.17% and 21.0%, respectively. Also, other anatomical properties of the root were observed with the use of silicon. The results also showed that the amount of phosphorus was increased and uptake by the plant root in the presence of silicon, as the application of appropriate levels of silicon could increase the root phosphorus concentration by about 45%.

Keywords: Root Biomass, Potassium Silicate, Silica Nanoparticles, Nutrient Element

[*] Corresponding author, Email: saberian@ut.ac.ir