Iranian Journal of Field Crop Science
Vol 52, No 2, Summer 2021 (201-2013)
DOI: 10.22059/IJFCS.2020.289360.654643

علوم گیاهان زراعی ایران
دورهٔ ۵۲، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۰ (ص۲۰۱۳-۲۰۱)

بررسی عملکرد و جذب عناصر کم‌مصرف در گیاه نخودفرنگی (*Pisum sativum* L. cv. Wando) تحت برهمکنش آهن و سیلیسیم

ام‌لیلا عباسپور شاهمرس[۱]، فرزاد رسولی*[۲]، فرهاد بهتاش[۲]، احمد آقایی[۳]

۱و۲- دانشجوی سابق و استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، ۳- استادیار زیست شناسی گروه زیست شناسی سلولی و مولکولی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۳۱ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۳۱)

چکیده

به‌منظور بررسی اثرات آهن و سیلیسیم روی عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) رقم wando، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار صورت انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح آهن (۰/۰۵، ۰/۱ و۰/۳ گرم بر لیتر) از منبع کلات آهن و سه سطح سیلیسیم (صفر، ۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع متاسیلیکات سیدم بودند. در این آزمایش، صفاتی همچون وزن تر و خشک دانه، تعداد دانه در غلاف، غلظت عناصر ریزمغذی همچون آهن، مس، روی و منگنز در برگ و دانه و همچنین غلظت سیلیسیم در برگ و دانه اندازه‌گیری شدند نتایج نشان داد که برهمکنش آهن و سیلیسیم در صفاتی همچون وزن تر و خشک دانه، غلظت آهن در برگ و دانه، منگنز در برگ، روی در برگ و دانه و سیلیسیم در برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و در صفات تعداد دانه در غلاف، غلظت مس در برگ و دانه و غلظت منگنز و سلیسیم در دانه اثرات ساده آهن و سیلیسیم معنی‌دار شد. نتایج مقایسات میانگین نشان داد که مصرف آهن و سیلیسیم به‌طور هم‌زمان، موجب افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک دانه و غلظت سیلیسیم در برگ شد و از طرف دیگر، کاهش معنی‌دار غلظت منگنز در برگ، و روی در برگ و دانه را در پی داشت. همچنینی افزایش غلظت آهن و سیلیسیم به‌صورت جداگانه، منجر به کاهش معنی‌دار مقدار مس در برگ و دانه و منگنز در دانه شد؛ البته با افزایش مقدار سیلیسیم در برگ، مقدار سیلیسیم دانه نیز افزایش یافت افزایش غلظت آهن به دلیل خصوصیات آنتاگونیستی و کاربرد سیلیسیم با جلوگیری از جذب فلزات سنگین همچون آهن، منگنز، مس و روی، باعث کاهش آن‌ها در برگ و دانه نخودفرنگی شد. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که سیلیسیم، اثرات منفی ناشی از سمیت آهن در سطوح بالا در نخودفرنگی را کاهش می‌دهد و می‌توان غلظت ۰/۱ گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر را به عنوان بهترین سطح تیماری آهن و سیلیسیم معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: اسید منو سیلیسیلیک، بقولات، تنش اکسیداتیو، ریزمغذی، هیدروپونیک.

Evaluation of yield and micronutrients uptake in *Pisum sativum* L. cv. wando under iron and silicon interaction

Omme Leila Abbaspour Shahmaras[1], Farzad Rasouli*[2], Farhad Behtash[2], Ahmad Aghaee[3]
1,2. Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Maragheh University, Maragheh, 3. Department of Biological Science, Faculty of Agriculture, Maragheh University.
(Received: September 22, 2019 - Accepted: April 19, 2020)

ABSTRACT

To assesse the iron and silicon effects on the yield and physiological characteristics of green pea, Wando cultivar by ASGrow Corporation was used in three levels of iron chelate (0.05, 0.1 and 0.3 gr per l^{-1}) and silicon (0, 14 and 28 mg per l^{-1}), as a factorial experimental in completely randomized design with three replications. In this experiment, characterisics such as fresh and dry weight of grain, the number of grain per pod, concentration of Fe, Cu, Mn, Zn and Si in leaf and grain were measured. Results showed that the interaction of Fe and Si was significant at $p<0.01$ on grain fresh and dry wigeht, concentratin of leaf and grain Fe, leaf Mn, leaf and grain Zn and leaf Si and the application of Fe and Si was significant separately, on other traits such as number of grain per pod, concentration of leaf and grain Cu, Mn and Si in grain. The Mean squares showed that the application of Fe and Si significantly increased fresh and dry grain weight and Si laef concetration and decreased the concentratin of leaf and grain Fe and Mn as well as grain Mn. The enhancement of Fe and Si application separately decreased the concentration of Mn, Cu and zinc leaf and grains, but the Si concentration of leaf and grain were increased by Si application. The concentration of Fe, Mn, Cu and Zn were decreased in leaf and grain because of antagonistic effects. It can be concluded that Si reduces the harmfull effects of high levels of iron toxicity and the application of 0.1 g/l and 25 mg/l can be recommended as the best treatments.

Keywords: Hydroponic, legumes, micronutrients, oxidative stress, siliciclastic acid.

* Corresponding author E-mail: Farzad.rasouli@maragheh.ac.ir

مقدمه

نخودفرنگی یکی از حبوبات مغذی است که حاوی (۳۵-۱۵ درصد) پروتئین و غلظت بالایی از آمینواسید لیزین و تریپتوفان می‌باشد. با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهان و نیاز روزافزون به غذا و به‌منظور افزایش بازده فرآورده‌های گیاهی و بهبود کیفیت آن‌ها، گرایش برای به‌کارگیری کودهای عناصر کم مصرف در میان کشاورزان رواج یافته است (Alam & Raza, 2004). مطابق آمار تولید جهانی، در سال ۲۰۱۸ کشورهای چین، هند، ایالات متحده، انگلستان، فرانسه، مصر، بلژیک-لوگزامبورگ، لهستان، مراکش و الجزایر، به‌ترتیب مقام‌های اول تا دهم را در تولید نخودفرنگی به خود اختصاص داده‌اند. کشور چین با تولید حدود ۸ میلیون تن در هکتار در رتبه اول قرار گرفته‌است. تولید ایران در سال ۲۰۱۸ حدود ۶ میلیون تن در مساحتی حدود ۳۳۳۲ هکتار بوده است (http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC). نخودفرنگی بهترین نتیجه را در آب و هوای خنک می‌دهد. جوانه زنی بذر در محدوده وسیعی از دمای خاک صورت می‌گیرد و دمای ۲۰ درجه، بهترین دما برای آن می‌باشد و در دمای بالاتر از ۲۵ درجه سانتی-گراد، درصد جوانه‌زنی کاهش می‌یابد. دمای مطلوب برای رشد رویشی بین ۱۳ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است و در دمای بالاتر از ۲۹ درجه سانتی‌گراد، رشد متوقف می‌شود. اگرچه نخودفرنگی سبزی فصل خنک است، اما به یخبندان حساس است. نیاز این گیاه به ازت خیلی کم است و از ۲۰ تا ۴۰ کیلوگرم در هکتار تجاوز نمی‌کند. مقدار ۶۰ کیلوگرم کود فسفاته و ۸۰ کیلوگرم کود پتاسه نسبت به نوع زمین، برای کاشت در نظر می‌گیرند (Gregory, 2015).

با وجود نیاز اندک گیاهان به عناصر کم مصرف، این مواد نقش اساسی در تغذیه، واکنش‌های آنزیمی، فرآیندهای متابولیکی و مقاومت گیاهان در برابر بیماری‌ها و شرایط نامساعد محیطی را ایفا می‌کنند (Nasiri *et al.,* 2013). بیشترین ریزمغذی مورد نیاز گیاهان، آهن است. آهن بخشی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیاء است و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز است (Peyvandi *et al.*, 2014). هر چند وجود برخی فلزات سنگین از جمله آهن در خاک برای رشد طبیعی گیاهان ضروری است، اما غلظت‌های زیاد این عناصر از طریق افزایش رادیکال‌های آزاد سمی و القاء تنش اکسیداتیو می‌تواند عاملی برای بازدارندگی رشد و ایجاد علایم سمیّت باشد (Kamfenkel & Montango, 1995). سمیّت آهن، یکی از مشکلات مطرح در شالیزارهای مختلف دنیا است که عملکرد برنج را از ۱۲ تا ۱۰۰ درصد کاهش داده است (Becker & Asch, 2005). سمیّت آهن در تنباکو باعث کاهش فتوسنتز و میزان کلروفیل و نیز کاهش میزان قندهای شش کربنه با افزایش فعالیت گلوگز شش فسفات دهیدروژناز سیتوزولی شده است (Kampfenkel & Montagu, 1995). در پژوهشی که بر روی سیب زمینی انجام شد، کمبود و سمیت آهن، باعث کلروز برگ و کاهش کلروفیل، کاهش عملکرد و کیفیت با کاهش نشاسته، کربوهیدرات و پروتئین شده است (Chaterijee, *et al.,* 2006). غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم آهن بر لیتر محلول غذاییف سبب کاهش سطح برگ و وزن خشک کل در گیاه کلم بروکلی شد (Pena-Olmos *et al.,* 2014). کاهش وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی با افزایش غلظت آهن در تیمار ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در گیاه برنج گزارش شده است (Meharaban & Abdolzadeh, 2018).

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در سطح زمین (۲۷/۷ درصد) و همچنین یکی از عناصر مهم تشکیل‌دهنده ساختمان کانی‌های رسی در بیشتر خاک‌ها می‌باشد و برای گیاه به عنوان یک عنصر مفید شناخته شده است (Epstein, 1999). از مهم‌ترین آثار مفید سیلیسیم در گیاهان، افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی است. همچنین این عنصر می-تواند باعث افزایش تولید و کیفیت محصول، کاهش تبخیر و تعرق، افزایش کارایی مصرف آب، افزایش تحریک تولید برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش حساسیت به بعضی بیماری‌های قارچی و مانع جذب

بیش از حد فلزات ضروری سنگین شود (Al-Aghabary *et al.*, 2004; Da chuna *et al.*, 2009; Yousefi *et al.*, 2014). وزن خشک شماری از تک‌لپه‌ای‌ها (یک تا سه درصد) و بیشتر دولپه‌ای‌ها به‌ویژه بقولات (کم‌تر از ۰/۵ درصد)، حاوی SiO_2 می‌باشد (Marshner, 1995). کاربرد سیلیسیم در کشت هیدروپونیک خیار نشان داد که وزن خشک و طول ریشه و شاخساره در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌داری داشته است (Mohghegh *et al.*, 2010). این پژوهشگران بیان کردند که افزایش فعالیت فتوسنتزی به دنبال استفاده از سیلیسیم، می‌تواند یکی از دلایل افزایش ماده خشک تولیدی باشد (Agarie *et al.*, 1998). از اثرات مثبت کاربرد سیلیسیم در گیاه برنج، افزایش مقاومت گیاه در برابر سمیّت آهن و منگنز می‌باشد؛ بدین صورت که میزان جذب آهن و منگنز را به‌وسیله گیاه کاهش می‌دهد. این کار از راه افزایش قدرت اکسیدکنندگی ریشه انجام می‌شود. بدین صورت که سیلیسیم سبب افزایش حجم و همچنین افزایش میزان سختی و عدم نفوذپذیری لوله‌های آئرانشیم می‌شود و در نتیجه آهن و منگنز دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی و منگنز چهار ظرفیتی اکسید می‌شوند و حلالیت آن‌ها کاهش می‌یابد (Okuda and Takahashi, 1965). در گیاه برنج، مصرف سیلیسیم باعث کاهش غلظت آهن شد، زیرا سیلیسیم قدرت اکسید کنندگی ریشه را افزایش می‌دهد و باعث اکسید شدن Fe^{+2} به Fe^{+3} می‌شود و یا با تشکیل رسوب آهن، مانع از جذب زیاد آهن می‌گردد (Wu, *et al.*, 2016). در پژوهشی بر روی ارقام مختلف برنج، کاربرد سیلیسیم منجر به افزایش جذب عناصر ضروری همچون مس و روی، افزایش زیست‌توده و افزایش وزن صد دانه در برخی ارقام شده است (Wang *et al.*, 2016). کاربرد سیلیسم، منجر به افزایش کمپلکس لیگنین-سیلیسیم-کربوهیدرات در دیواره سلولی جایگاه‌های فراوانی برای جذب فلزات سنگین ایجاد می‌کند (Da Cunha & Do Nascimento, 2009). با توجه به انعطاف‌پذیری این جایگاه‌ها، احتمال دارد که در محافظت از غلظت بهینه آهن فعال نقش ایفا کنند. در برنج، با کاربرد غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیم همراه غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن در لیتر، موجب افزایش وزن خشک شاخساره و ریشه، افزایش محتوای نسبی آب و زیست‌توده گیاه شده است، اما در غلظت‌های بالاتر آهن، قادر به کاهش اثرات سمیت آن نشده است (Kiani Chalmardi & Abdol Zadeh, 2013). در مطالعهٔا که بر روی پنبه انجام شده است، سیلیسم در غلظت یک میلی‌مولار، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه را افزایش داد و همچنین سبب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی در حضور سرب شد (Bharwana *et al.*, 2013).

تاکنون هیچ مطالعه‌ای در ارتباط با نقش سلیسیم در شرایط کمبود و سمیت آهن در بقولات گزارش نشده است. پژوهش در این رابطه، به مصرف بهینه آهن و از سوی دیگر، درک اثرات سودمند سلیسیم بر روی صفات مهم همچون عملکرد و ماده خشک و جذب سایر ریزمغذی ها و همچنین کاهش اثرات سمیت فلزات سنگین همچون آهن می‌تواند در افزایش عملکرد و مصرف بهینه آهن کمک کند و ارتباط جذب ریزمغذی‌ها همراه با کاربرد سیلیسیم در نخودفرنگی مورد بررسی قرار گیرد، زیرا پاسخ گیاهان مختلف به کاربرد سیلیسیم کاملا متفاوت بوده است. بر همین اساس، این پژوهش برای مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف آهن و سیلیسیم روی عملکرد دانه و همچنین غلظت برخی از عناصر میکرو در برگ و دانه نخود-فرنگی انجام شد. علاوه براین، هدف دیگر این پژوهش، انتخاب بهترین غلظت آهن و سیلیسیم به‌طور همزمان در شرایط هیدروپونیک بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، روی نخودفرنگی رقم Wando تهیه شده از شرکت ASGrow در شرایط هیدروپونیک انجام شد. آبیاری با استفاده از محلول غذایی هوگلند تغییر یافته انجام شد (Coolong *et al.*, 2004). آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور، سیلیسیم با سه سطح (صفر، ۱۴ و ۲۸

میلی‌گرم بر لیتر) از منبع متاسیلیکات سدیم (Na2SiO3.5H2O) و آهن با سه سطح (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۳ گرم بر لیتر) از منبع کلات آهن با نام تجاری (Super Ferrorelizer) تولید شده در شرکت فن آوری مهر پاسارگاد و حاوی ۱۳٪ (+Fe2)، با سه تکرار در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. پس از جدا نمودن قسمت هوایی گیاه از اندام زیرزمینی، وزن تر برای کلیه تیمارها محاسبه شد و سپس جهت تعیین وزن خشک آن‌ها، نمونه‌های قسمت هوایی در درون پاکت کاغذی قرار داده شدند و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سلیسیوس در آون قرار گرفتند . اندازه‌گیری وزن خشک به‌وسیله ترازوی دیجیتال مدل (AND مدل EK3000I ساخت کشور ژاپن) با دقت ۰/۰۱ گرم انجام گرفت. غلظت عناصر نمونه‌های گیاهی (در برگ و دانه)، به روش هضم تر دانگ و همکاران تعیین شد (Dong *et al*., 2006). پس از این‌که نمونه‌های گیاهی به‌طور جداگانه به‌وسیله اسید نیتریک غلیظ هضم شدند، عصاره حاصل توسط کاغذ واتمن نمره ۴۲ صاف شد و توسط آب مقطر در بالن ژوژه‌ها به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس عصاره‌ها به ظروف پلاستیکی ۱۰۰ میلی‌لیتر انتقال داده شدند و در پایان برای تعیین غلظت عناصر در نمونه‌های گیاهی، دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA6300, Japan) مورد استفاده قرار گرفت. غلظت سیلیسیم در نمونه‌های (برگ و دانه) نخودفرنگی با روش Van Der Vorm (1987) و در طول موج ۸۱۱ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر (UNIC V 2100) تعیین شد. داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم افزار MSTAT-C ver 2.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد و نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

وزن تر و خشک دانه

اثرات متقابل آهن و سیلیسیم بر روی وزن تر دانه نخودفرنگی معنی‌دار بود (جدول ۱)، به‌طوری‌که بیشترین میزان وزن تر دانه، به تیمار ۰/۱ گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر (۹/۶ گرم) و کمترین مقدار نیز به تیمار ۰/۰۵ گرم کلات آهن بر لیتر و بدون کاربرد سیلیسیم (۳/۰۶۷ گرم) تعلق داشت.

جدول ۱- تجزیه واریانس برهمکنش اثرات آهن و سیلیسم بر صفات وزن تر و خشک دانه، تعداد دانه در غلاف و غلظت آهن و منگنز در برگ و دانه نخود فرنگی

Table1.Variance analysis of Fe and Si interaction on fresh and dry weight of grain, number of grain per pod and Fe and Mn concentration in leaf and grain of green pea

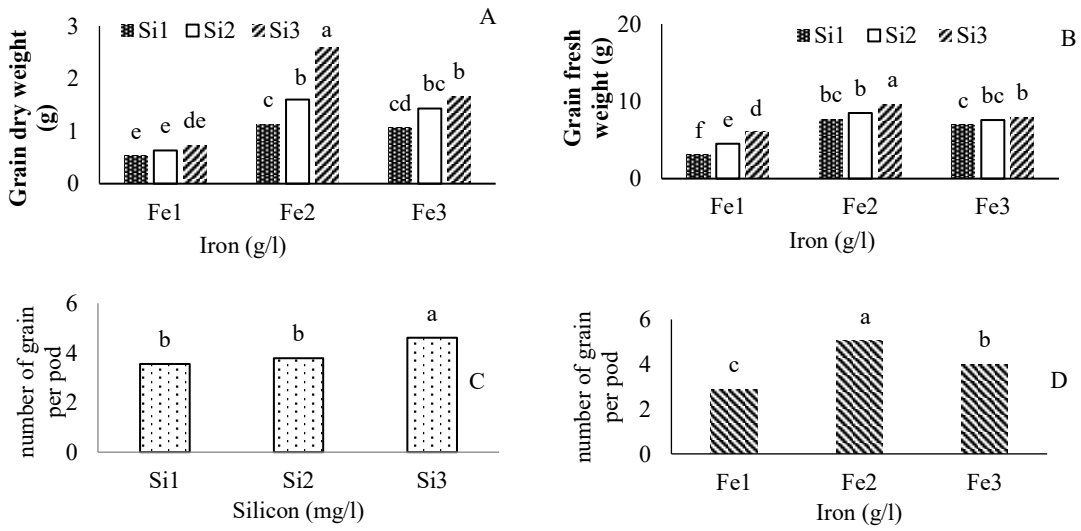
Source of variation	df	Fresh weight of grain	Dry weight of grain	Number of grain per pod	Fe concentration of leaf	Fe concentration of grain	Mn concentration of leaf	Mn concentration of grain
Replication	2	0.250^{ns}	0.063^{ns}	0.176^{ns}	76.576^{ns}	0.723^{ns}	8.235^{ns}	0.219^{ns}
Fe	2	39.418^{**}	3.048^{**}	10.556^{**}	$11702/982^{**}$	170.968^{**}	1366.064^{**}	7.495^{**}
Si	2	8.608^{**}	1.298^{**}	2.757^{**}	$8342/747^{**}$	766.671^{**}	643.137^{**}	6.440^{**}
Fe × Si	4	0.771^{*}	0.346^{**}	0.30^{ns}	$815/524^{**}$	25.809^{**}	39.846^{**}	0.174^{ns}
Error	16	0.233	0.043	0.218	24/222	2.667	10.715	0.116
C. V (%)		6.88	16.28	11.62	1.53	4.24	3.41	5.05

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی‌دار.

**, *, ns: significant at 1% and 5% of probability levels and non-signficant, respectively.

با کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی، وزن تر دانه در تمامی سطوح غلظت آهن افزایش یافت که البته افزایش تیمار سیلیسیم با افزایش آهن استفاده شده، مقدار آهن دانه را کمتر بالا برد، به‌طوری‌که در در تیمارهای Fe_1Si_3، Fe_2Si_3 و Fe_3Si_2 در مقایسه با تیمارهای Fe_1Si_1، Fe1Si2 و Fe_1Si_1 به‌ترتیب ۹۶/۷۰، ۲۵/۲۱ و ۸/۶۱ درصد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل 1B). بیشترین میزان وزن خشک دانه همانند

وزن تر، در تیمار ۰/۱ گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر (۲/۵ گرم) و کمترین در تیمار ۰/۰۵گرم کلات آهن بر لیتر و بدون کاربرد سیلیسیم (۰/۵۳۳) مشاهده شد. با کاربرد سیلیسم در تمامی تیمارهای آهن، افزایش وزن خشک مشاهده شد؛ البته این افزایش در مقادیر بالای آهن کمتر بود، به‌طوری‌که در تیمارهای Fe_1Si_3، Fe_2Si_3 و Fe_3Si_3 در مقایسه با Fe_1Si_3، Fe_2Si_3 و Fe_3Si_2 به‌ترتیب، ۳۷/۵۲، ۱۲۹ و ۳۴/۳۰ درصد افزایش معنی‌دار مشاهده شد (شکل 1A). اگرچه سیلیسیم یک عنصر غیرضروری برای اغلب گیاهان است، با این حال مطالعات مختلف نشان داده است که سیلیسیم بر میزان فتوسنتز، رشد گیاه و توسعه سالم بسیاری از گونه‌های گیاهی ضروری اثرگذار است (Shi *et al*.,2010). بر اساس نتایج یک تحقیق، وزن خشک ساقه و ریشه در دو رقم خیار تحت تنش شوری کاهش یافت، درحالی‌که مصرف سیلیسیم، سبب افزایش وزن خشک ساقه و ریشه شد (Zhu *et al.*, 2004). کاربرد سیلیسیم در کشت هیدروپونیک برنج تحت تنش کمبود و سمیّت آهن، منجر به افزایش وزن تر و وزن خشک و طول گیاه شد (Kiani chalmardi *et al.*, 2013). به نظر می‌رسد که سیلیسیم به‌صورت سیلیس آمورف یا سیلیکاژل ($SiO2.nH2O$)، در دیواره سلول‌ها رسوب می‌کند، از سلول‌های گیاه در برابر تنش‌های غیر زیستی مانند سمیّت عناصر محافظت می‌کند، عملکرد رویشی را بالا می‌برد و باعث ثبات دیواره سلولی گیاه می‌شود (Epestien, 1999).



شکل ۱- اثرات سطوح مختلف سلیسیم و آهن بر وزن خشک دانه (A)، وزن تر دانه (B) و تعداد دانه در غلاف (C,D). ستون‌های دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure1. Ineractions effects of Si and Fe on dry (A) and fresh (B) weights and the grain number per pod (C,D) Columns with the same letters have no significant differences based on Duncan test at 5% of probalility level.

تعداد دانه در غلاف

اثرات متقابل آهن و سیلیسیم بر تعداد دانه در غلاف معنی‌دار نبود، ولی اثرات ساده آن‌ها معنی‌دار شدند (جدول ۱)، به‌طوری‌که با افزایش غلظت آهن در محلول غذایی، تعداد دانه در هر غلاف به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2 و Fe_3 (۰/۱ و ۰/۳ گرم کلات آهن بر لیتر) ۷۴/۷۴ و ۳۸/۴ درصد نسبت به تیمار Fe_1 (۰/۰۵ گرم کلات آهن بر لیتر) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل 1D). در گیاه برنج، غلظت‌های زیاد Fe^{2+} در بستر کاشت، سبب افزایش غلظت آن در ریشه و برگ‌ها شد و همچنین گزارش شده است که منجر به کاهش غلظت سایر عناصر در گیاه می‌شود؛ به دلیل این‌که این عناصر برای رشد و نمو محصول ضروری‌اند و کاهش در میزان آن‌ها، موجب کاهش در

رشد و عملکرد دانه محصول می‌شود (Majerus *et al.,* 2007). طی مطالعه‌ای روی گیاه نخود، افزایش غلظت آهن (۴۰ میلی‌گرم بر لیتر) سبب کاهش میزان رشد گیاه شد. این پژوهشگر بیان کرد که غلظت زیاد آهن، سبب تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که احتمالاً دلیلی برای بازدارندگی رشد گیاه می‌باشد (Nenova, 2006).

با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول غذایی، تعداد دانه در هر غلاف از ۳/۵۶ در تیمار Si_1 به ۳/۷۸ و ۴/۶۱ به‌ترتیب در تیمار Si_2 و Si_3 (۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر) افزایش یافت که اختلاف بین دو تیمار Si_1 و Si_2 معنی‌دار نبود، ولی تیمار Si_3 با افزایش ۲۹/۴ درصد تعداد دانه درغلاف، باعث افزایش معنی دار نسبت به تیمار بدون سیلیسیم شد (شکل ۱C). همچنین نتایج پژوهشی نشان داد که مصرف سیلیسیم، باعث افزایش عملکرد دانه و سطح برگ لوبیا در شرایط تنش شوری شد (Zuccarini, 2008). سیلیسیم از طریق افزایش مقدار کلروفیل، افزایش سطح برگ و میزان فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد (Kaya *et al.,* 2006).

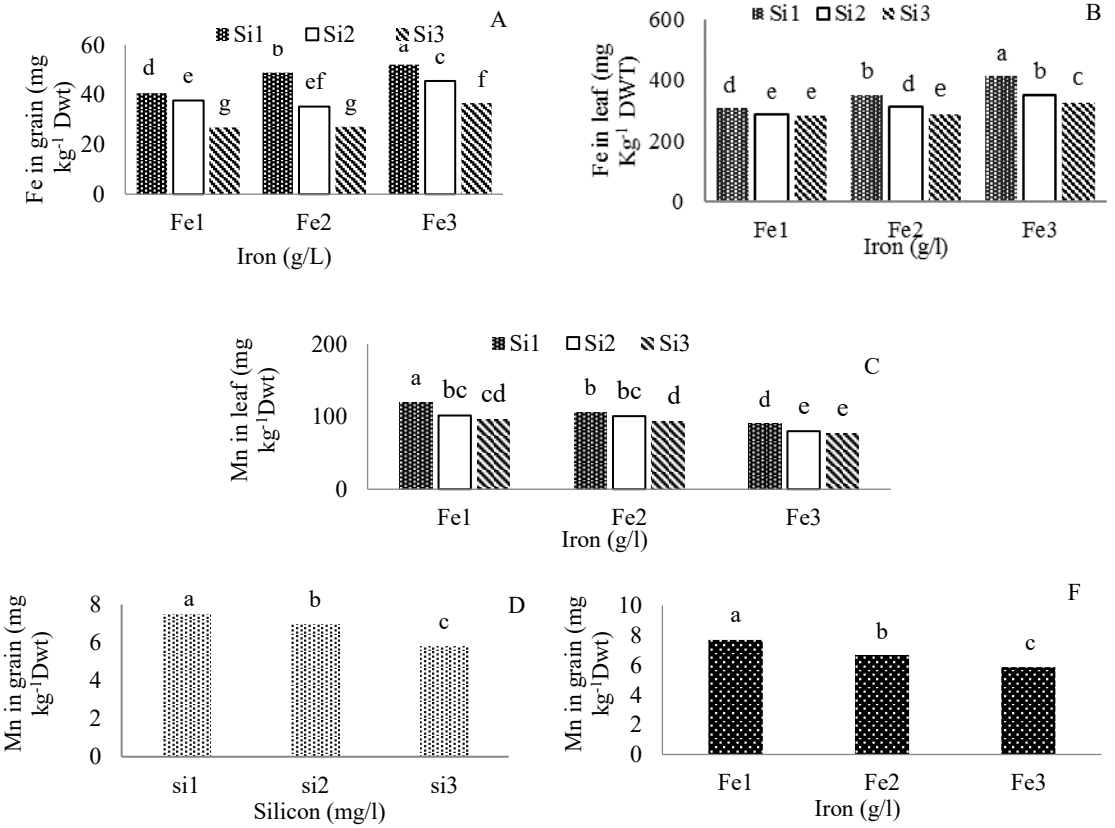
غلظت آهن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش آهن و سیلیسیم بر غلظت آهن دانه معنی‌دار بود. در تیمارهای Fe_1Si_3 و Fe_2Si_3، کمترین غلظت آهن در دانه با مقادیر ۲۶/۸۷ و ۲۷/۱ mg kg^{-1}Dwt شد و بیشترین غلظت آهن در تیمار Fe3Si1 با غلظت mg ۴۰/۷۳ kg^{-1}Dwt مشاهده شد بر اساس نتایج مقایسات میانگین می‌توان اظهار داشت که با افزایش کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی، غلظت آهن در دانه کاهش یافت، به‌طوری‌که در تیمارهای Fe1، Fe2 و Fe3 به‌ترتیب با افزایش سیلسیم، مقدار آهن ۳۴، ۴۴/۵ و ۲۹/۶۹ درصد به‌صورت معنی‌دار کاهش یافت. همچنین با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، غلظت آهن برگ از mg kg^{-1}Dwt ۳۰۶/۰۸ در تیمار ۰/۰۵گرم کلات آهن بر لیتر و بدون کاربرد سیلیسیم (Fe_1Si_1) به mg kg^{-1}Dwt ۳۵۰/۱۵ و۴۱۲/۴۰ به‌ترتیب در تیمارهای ۰/۱ گرم کلات آهن بر لیتر و بدون کاربرد سیلیسیم (Fe_2Si_1) و ۰/۳ گرم بر کلات آهن لیتر و بدون کاربرد سیلیسیم (Fe_3Si_1) افزایش یافت. با افزایش مقدار سیلیسیم در تمامی تیمارها، غلظت آهن کاهش پیدا کرد، به‌طوری‌که در Fe_1Si_2، Fe_2Si_3 و Fe_3Si_3 در مقایسه با Fe_1Si_1، Fe_2Si_1 و Fe_3Si_1 به‌ترتیب ۶/۸۹، ۱۸/۴۰ و ۲۱/۵۲ درصد کاهش یافت (شکل ۲B). بر اساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان بیان کرد که با افزایش غلظت آهن در محلول غذایی، غلظت آهن در برگ و دانه نخودفرنگی افزایش یافت، اما سیلیسیم موجب کاهش غلظت آهن در برگ و دانه نخودفرنگی شد (شکل ۲A,B). در نتایج بدست آمده از پژوهش‌های انجام شده روی برنج و خیار نیز نشان داد که با کاربرد سیلیسیم، مقدار آهن کاهش پیدا کرد و بیان شد که سیلیسیم با کاهش جذب آهن و اکسایش آن (اکسید شدن Fe^{+2} به Fe^{+3}) در سطح ریشه گیاه، سبب کاهش غلظت آهن در بافت‌های گیاه می‌شود (Okuda *et al.,* 1962; Khodarahmi *et al.,* 2012). نتایج پژوهشی روی گیاه برنج نشان داد که افزایش آهن در محیط ریشه گیاه، جذب بیشتر آهن و افزایش غلظت آهن، هم در بافت ریشه و هم در بخش هوایی را سبب شد؛ البته غلظت آهن در ریشه نسبت به بخش هوایی زیاد بود که می‌تواند به دلیل تجمع این عنصر در آپوپلاست و عدم انتقال آن به بخش‌های هوایی باشد (Becker & Asch, 2005).

غلظت منگنز

برهمکنش تیمارهای آهن و سیلیسیم بر میزان غلظت برگ اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲). با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش، بیشترین غلظت منگنز، به تیمار ۰/۰۵ گرم کلات آهن بر لیتر و صفر میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر و کمترین غلظت منگنز به تیمار ۰/۳گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر تعلق داشت. مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۲C) نشان داد که با افزایش غلظت آهن و سیلیسیم در محلول غذایی، غلظت منگنز در برگ از mg kg^{-1}Dwt ۱۱۹/۶۲ در تیمار Fe_1Si_1 با اختلاف

معنی‌داری به ۷۹/۷۷ mg kg^{-1}Dwt و ۷۷/۷۲ به‌ترتیب در Fe_2Si_1 و Fe_3Si_1 کاهش یافت ک معادل حدودا ۳۳ درصد و معنی‌دار بود. در واقع نتایج نشان دهنده این است که با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، از میزان غلظت منگنز دانه کاسته شده است که این احتمالا به دلیل اثر آنتاگونیسمی بین آهن و منگنز می‌باشد. نتایج تحقیقات بر روی گیاه سویا نشان داد که که مصرف خاکی آهن، غلظت و جذب منگنز را در ریشه سویا کاهش داد که احتمالاً به دلیل اثر آنتاگونیسمی آهن بر جذب منگنز در ریشه گیاه باشد (Ronaghi & Moosavi, 2011). همچنین نتیجه مشابهی از پژوهش روی گیاه نخود گزارش شده است که مصرف خاکی یا محلول پاشی آهن، موجب کاهش جذب و غلظت منگنز در قسمت هوایی گیاه شد (Ghasemi fasai, *et al.*, 2018).



شکل ۲- اثر سطوح مختلف سیلیسیم و آهن بر غلظت آهن در دانه (A) و برگ (B) و منیزیم در برگ (C) و دانه (D,E).
ستون‌های دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 2. Effects of Si and Fe on Fe concentration in grain (A) and leaf (B) and Mg concentration in leaf (C) and grain (D,E). Columns with the same letters have no significant differences based on Duncan test at 5% of probalility level.

اثرات متقابل آهن و سیلیسیم بر محتوای منگنز دانه معنی‌دار نبود، اما اثرات ساده هر دو تیمار معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، میانگین غلظت منگنز در دانه نخودفرنگی از ۷/۶۹ mg kg^{-1}Dwt در تیمار Fe_1 به ۶/۹۸ mg kg^{-1}Dwt و ۵/۸۷ به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2 و Fe_3 کاهش معنی‌داری داشت که این کاهش به‌ترتیب حدود ۹/۲ و ۲۳ درصد بود (شکل ۲F). با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، از میزان غلظت منگنز دانه نیز همچون برگ کاسته شده است که این به دلیل اثر آنتاگونیسمی بین آهن و منگنز می‌باشد (Van Der Vorm & Van Diest, 1979; Ghasemi-Fasaei *et al.*, 2005; Moosavi & Ronaghi 2011). کاربرد سیلیسیم، میانگین غلظت

منگنز در دانه را از ۷/۴۶ mg kg^{-1}Dwt در تیمار Si_1 به ۶/۹۸ mg kg^{-1}Dwt و ۵/۸۱ به‌ترتیب در تیمارهای Si_2 و Si_3 به‌صورت معنی‌داری کاهش داد که به‌ترتیب کاهش مشاهده شده حدود ۶/۴۳ و ۲۲/۱۱ درصد بود (شکل 2D). دلایل کاهش منگنز در اثر سیلیسیم، هنوز کاملا شناخته نشده است. گزارش شده که کاهش غلظت منگنز در اثر کاربرد سیلیسیم، احتمالاً به دلیل شکل‌گیری کمپلکس‌های منگنز سیلیکات در بستر ریشه و یا در داخل گیاه بوده است که منجر به کاهش در دسترس بودن منگنز می‌شود (Che *et al.,* 2016).

غلظت مس

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثرات متقابل آهن و سیلیسیم بر غۀظت مس در برگ معنی‌دار نبود، اما اثرات ساده آهن و سلیسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، میانگین غلظت مس در دانه نخود-فرنگی از ۱۱/۲۵ mg kg^{-1}Dwt در تیمار Fe_1 به ۹/۸۷ mg kg^{-1} Dwt و ۷/۹۷ به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2 و Fe_3 کاهش یافت که کاهش معنی‌دار مشاهده شده به‌ترتیب ۱/۷۸ و ۲۹/۱۵ درصد بود. همچنین با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، میانگین غلظت مس در برگ نخودفرنگی از ۶۷/۵۹ mg kg^{-1}Dwt در تیمار Fe_1 به ۵۶/۳۵ و ۵۱/۶۵ mg kg^{-1}Dwt به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2 و Fe_3 کاهش یافت که این اختلاف مهنی‌دار، به‌ترتیب معادل ۱۶/۶۲ و ۲۳/۵۸ درصد بود (شکل 3A,B). با افزایش غلظت آهن، از میزان غلظت مس در برگ و دانه نخودفرنگی کاسته شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس برهمکنش آهن و سیلیسم بر غلظت مس، روی و سلیسیم در برگ و دانه نخود فرنگی

Table1.Variance analysis of interaction ettects of Fe and Si on Cu, Zn and Si concentration in green pea leaf and grain

Source of variation	df	Cu concentration of leaf	Cu concentration of grain	Zn concentration of leaf	Zn concentration of grain	Si concentration of leaf	Si concentration of grain
Replication	2	2.787^{ns}	2.561^{ns}	31.046^{ns}	3.838^{ns}	0.006^{ns}	0.009^{ns}
Fe	2	603.676**	27.148**	9179.828**	322.279**	0.0098**	0.008**
Si	2	92.473**	66.909**	13297.082**	209.761**	0.594**	0.006**
Fe × Si	4	3.236^{ns}	0.733^{ns}	864.131**	4.222**	0.005**	0.002^{ns}
Error	16	1.667	0.411	8.067	0.266	0.001	0.002
C. V (%)		2.21	6.68	1.86	1.47	7.15	7.65

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی‌دار.

**, *, ns: significant at 1% and 5% of probability levels and non-signficant, respectively.

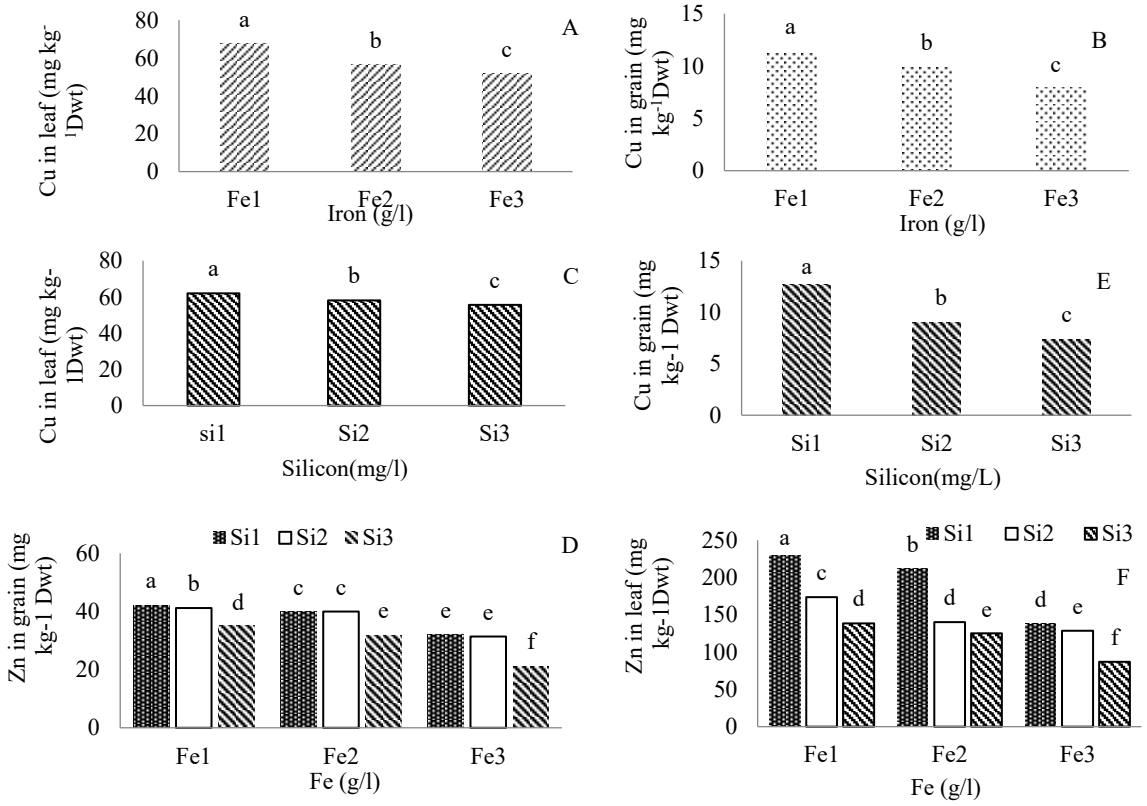
استفاده بیش از حد نیاز از کودهای کلات آهن، منجر به جذب مقدار زیادی آهن در گیاهان می‌شود. این امر باعث به هم خوردن تعادل تغذیه‌ای و کاهش میزان عناصر مس، منگنز و روی در گیاهان، به‌دلیل وجود برهمکنش منفی بین عنصر آهن با این عناصر می‌شود که می‌تواند به دلیل رابطه آنتاگونیسمی بین این عناصر باشد (Ronaghi & Ghasemi-Fasaei, 2008).

کاربرد سیلیسیم، میانگین غلظت مس برگ را از mg ۶۱/۹۵ kg^{-1} Dwt در تیمار Si_1 به mg kg^{-1} Dwt ۵۸/۰۴ و ۵۵/۵۹ به‌ترتیب در تیمارهای Si2 و Si3 با اختلاف معنی‌دار به‌ترتیب ۶/۳۱ و ۱۰/۲۶ درصد کاهش داد. با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول غذایی، میانگین غلظت مس در دانه از ۱۲/۶۴ mg kg-1Dwt در تیمار Si1 به ۹ و ۷/۳۶ mg kg-1Dwt به‌ترتیب در تیمارهای Si2 و Si3 رسید که به‌ترتیب ۲۸/۷۹ و ۴۱/۷۷ درصد کاهش مشاهده شد (شکل 3C,E). سیلیسیم به‌عنوان عنصری که نقش مهمی در کاهش اثر سمی برخی فلزات سنگین دارد، شناخته شده است؛ مکانیسمی که به موجب آن، سیلیسیم سبب کاهش غلظت مس در بافت‌های گیاه می‌شود، هنوز به‌طور دقیق مشخص نشده است. البته برخی پژوهشگران بیان داشته‌اند که سیلیسیم بر توزیع و قابلیت دسترس بودن مس در

بافت‌های گیاه تأثیر می‌گذارد (Collin *et al.*, 2013).

غلظت روی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، کاربرد همزمان آهن و سیلیسیم، بر غلظت روی در برگ در سطح احتمال یک رصد اثر معنی‌دار داشت. بیشترین مقدار روی در برگ در تیمار Fe_1Si_1 و کمترین مقدار نیز در تیمار Fe_3Si_3 مشاهده شد. در تمامی تیمارها، با افزایش غلظت آهن و سیلیسیم، غلظت روی در برگ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، غلظت روی در برگ را از ۲۲۹/۹۲ mg kg^{-1} Dwt در تیمار Fe_1Si_1 به ۲۱۱/۹۲ mg kg^{-1}Dwt و ۱۳۷/۹۷ به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2Si_1 و Fe_3Si_1 کاهش معنی‌دار داد؛ کاهش مشاهده شده به‌ترتیب معادل ۷/۸۲ و ۳۹/۹۹ درصد بود. همچنین در هر کدام از تیمارهای آهن، با افزایش سیلیسیم، غلظت روی در برگ بیشتر کاهش پیدا کرد (شکل ۳F).



شکل ۳- اثر سطوح مختلف آهن و سیلیسیم بر غلظت مس در برگ (A,C) و دانه (B,E) و روی در دانه (D) و برگ (F).
ستون‌های دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

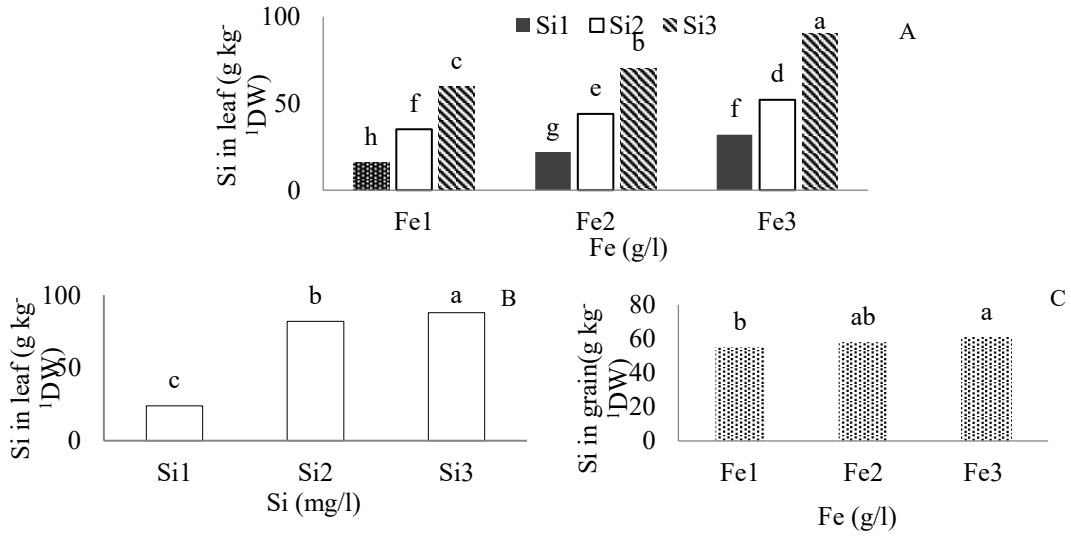
Figure 3. Effect of Si and Fe on Cu concentration in leaf (A,C) and grain (B,E) and Zn concentration in leaf (D) and grain (F). Columns with the same letters have no significant differences based on Duncan test at 5% of probalility level

به عبارت دیگر، با افزایش غلظت کلات آهن و سیلیسیم در محلول غذایی، غلظت روی در برگ نخودفرنگی کاهش یافت. همچنین غلظت روی در دانه نیز در اثر برهمکنش آهن و سیلیسیم به‌طور معنی-داری در سطح احتمال یک درصد کاهش یافت. با افزایش غلظت کلات آهن در محلول غذایی، غلظت روی دانه از ۴۲/۱۸ mg kg^{-1}Dwt در تیمار Fe_1Si_1 به ۳۹/۹۶ و ۳۱/۹۷ mg kg^{-1}Dwt به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2Si_1 و Fe_3Si_1 کاهش یافت که اختلاف بین این تیمارها ۵/۲۶ و ۲۴/۲۰ درصد بود. بر اساس مقایسه

میانگین داده‌ها مشاهده شد که با افزایش کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی و در هر کدام از تیمارهای آهن، به عنوان مثال غلظت روی دانه از ۴۲/۱۸ mg kg^{-1} Dwt در تیمار Fe_1Si_1 به ۴۱/۲۰ و ۳۵/۲۶ mg kg^{-1} Dwt به‌ترتیب در تیمارهای Fe_1Si_2 و Fe_1Si_3 کاهش یافت و به عبارتی، افزایش سیلیسیم با ثابت ماندن غلظت آهن نیز موجب کاهش معنی‌دار ۲/۳۲ و ۱۶/۴۰ شد (شکل ۳D). بیشترین غلظت روی، به تیمار ۰/۰۵ گرم کلات آهن بر لیتر و صفر میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر و کمترین غلظت روی به تیمار ۰/۳ گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر تعلق داشت. نتایج تحقیقات در ارتباط با اثر آهن بر غلظت برخی ریزمغذی‌ها در درختان هلو نشان داد که افزایش غلظت آهن، باعث کاهش جذب روی شده است و به نظر می‌رسد که آهن به عنوان یک کاتیون رقیب، از انتقال متابولیکی روی در مکان‌های جذب جلوگیری می‌کند (Basar & Ozgumus, 1999). سیلیسیم باعث کاهش انتقال فلزات سنگین از طریق مسیر سیمپلاست می‌شود و در درون سلول با عناصر دیگر، ترکیب ناپایدار سیلیکات را تشکیل می‌دهد. سپس سیلیکات‌ها به تدریج تجزیه شده و SiO_2 تولید می‌کنند و در سیتوپلاسم باقی می‌مانند، درصورتی‌که عناصر به درون واکوئل انتقال یافته و با اسیدهای آلی ترکیب می‌شوند (Neumann & Nieden, 2001). پس تصور بر این است که احتمالا کاربرد سیلیسیم، باعث کاهش انتقال روی از طریق مسیر سیمپلاست می‌شود و بدین جهت، افزایش غلظت سیلیسیم در محلول غذایی، باعث کاهش غلظت روی در برگ‌ها شده است.

غلظت سیلیسیم

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش آهن و سیلیسیم بر مقدار سیلیسیم در برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسات میانگین نشان داد که با افزایش غلظت آهن در محلول غذایی، غلظت سیلیسیم از ۱۶ درصد در تیمار Fe_1Si_1 به ۲۲ و ۳۲ درصد به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2Si_1 و Fe_3Si_1 افزایش ب معنی‌دار یافت. همچنین با افزایش کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی همراه با ثابت ماندن غلظت آهن، به‌طور مثال غلظت آن از ۱۶ درصد در تیمار Fe1Si1 به ۳۵ و۶۰ درصد به‌ترتیب در تیمارهای Fe1Si2 و Fe1Si3 افزایش یافت که اختلاف بین هر سه تیمار معنی‌دار بود (شکل ۴A).



شکل۴- اثرات سطوح مختلف آهن و سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم در برگ (A) و در دانه (B,C). ستون‌های دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 4. Effect of Si and Fe on Si concentration in leaf (A) and grain (B,C). Columns with the same letters have no significant differences based on Duncan test at 5% of probalility level

با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش، کمترین غلظت سیلیسیم، مربوط تیمار ۰/۰۵ گرم آهن بر لیتر و صفر میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر و بیشترین غلظت سیلیسیم، به تیمار ۰/۳گرم آهن بر لیتر و ۲۸ میلی-گرم سیلیسیم بر لیتر تعلق داشت. اثرات متقابل آهن و سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم دانه معنی‌دار نبود، اما اثرات ساده آهن و سیلیسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با افزایش غلظت آهن در محلول غذایی، میانگین غلظت سیلیسیم در برگ از $g\ kg^{-1}$ DW ۵۵ در تیمار Fe_1 به ۵۸ و $g\ kg^{-1}$ DW ۶۱ به‌ترتیب در تیمارهای Fe_2 و Fe_3 افزایش یافت. با توجه به نتایج، بیشترین غلظت سیلیسیم در تیمار Fe_3 (۰/۳گرم آهن بر لیتر) و کمترین غلظت سیلیسیم در تیمار (۰/۰۵ گرم آهن بر لیتر) مشاهده شد. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۴) نشان داد که با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول غذایی، میانگین غلظت سیلیسیم دانه از $g\ kg^{-1}$ DW ۲۴ در تیمار Si_1 (صفر میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر) به ۸۲ و $g\ kg^{-1}$ DW ۸۸ به‌ترتیب در تیمارهای Si_2 و Si_3 افزایش یافت. با توجه به نتایج، بیشترین غلظت سیلیسیم به تیمار Si_3 و کمترین غلظت آن به تیمار Si_1 تعلق داشت. با افزایش کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی، غلظت سیلیسیم در گیاه گندم افزایش یافت (Levent *et al.*, 2008). در گیاه برنج تحت تنش کمبود و سمیّت آهن، حضور سیلیسیم در محیط کشت، منجر به افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم در ریشه و بخش هوایی گیاه شد (Kiani Chalmardi *et al.,* 2013).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان اظهار داشت که غلظت ۰/۳ گرم کلات آهن بر لیتر، باعث ایجاد سمیّت در نخودفرنگی شد و از طرف دیگر، کاربرد سیلیسیم در برخی صفات همچون وزن تر و خشک دانه و همچنین غلظت آهن، اثرات سمیت سیلیسیم را به‌طور معنی داری کاهش داد. از طرف دیگر، نتایج این پژوهش نشان داد که مصرف آهن تا غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر، سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن در برگ و دانه نخودفرنگی شد و همچنین جذب سایر ریز مغذی‌ها (روی، مس و منگنز) را تحت تاثیر قرار دا، با این‌که یکی از اهداف این آزمایش، مطالعه مصرف کمتر آهن در شرایط هیدروپونیک بود، اما کاهش آهن کمتر از ۰/۱ گرم بر لیتر، منجر به کاهش عملکرد دانه و وزن تر آن شد و در نتیجه مقدار ۰/۱ گرم بر لیتر، حداقل مقدار پیشنهادی در این پژوهش برای کشت و کار هیدروپونیک نخودفرنگی است. افزایش غلظت آهن به دلیل خصوصیات آنتاگونیستی، موجب کاهش سایر عنصر ریز مغذی شد. همچنین کاربرد سیلیسیم با جلوگیری از جذب فلزات سنگین همچون آهن، منگنز، مس و روی، باعث کاهش آن‌ها در برگ و دانه نخودفرنگی شد که این کاهش با کاربرد همزمان آهن و سیلیسیم، کاهش معنی‌دار بیشتری داشت. با توجه به این‌که بیشترین عملکرد (وزن تر و خشک دانه) نخودفرنگی در غلظت ۰/۱ گرم کلات آهن بر لیتر و ۲۸ میلی‌گرم سیلیسیم بر لیتر به‌دست آمد، می‌توان این تیمار را به عنوان بهترین سطح تیماری آهن و سیلیسیم معرفی کرد، چراکه کاربرد معنی‌دار سیلیسیم در بهبود عملکرد نخودفرنگی را نشان می-دهد و باعث افزایش معنی‌دار تعداد دانه در غلاف به-عنوان یکی از اجزای عملکرد شد. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد سیلیسیم می‌تواند از یک سو باعث بهبود عملکرد شود و از سوی دیگر، در صورت وجود شرایط سمیت فلزات سنگین همچون آهن، منگنز، روی و مس، سمیت را کاهش داده و از اثرات مخرب آن جلوگیری نماید.

ب

REFERENCES

1. Agarie, S., Hanaoka, N., Ueno, O., Miyazaki, A., Kubota, F., Agata, W. & Kaufman, P. B. (1998). Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science,* 1, 96-103.

2. Al-Aghabary, K., Zhu, Z. & Shi, Q. (2004). Influence of Silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 2101– 2115.
3. Alam, S. & Raza, S. (2004). Micronutrient Fertilizer. *Pakistan Journal of Biological Science,* 4, 1446-1450.
4. Bharwana, S. A., Ali, S., Farooq, M. A., Iqbal, N., Abbas, F. & Ahmad, M. S. A. (2013). Alleviation of lead toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes suppressed lead uptake and oxidative stress in cotton. *Journal of* Bioremediation *&* Biodegradation, 4(4).
5. Basar, H. & Ozgumus, A. (1999). Effect of various iron fertilizers and rates on some micro nutrient concentrations of peach trees. *Jornal of Agricultur and Forestry*, 23, 273-281.
6. Batty, L. C. & Younger, P. L. (2003). Effects of external iron concentration upon seedling growth and uptake of Fe^{+2} and phosphate by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel. *Annals of Botany*, 92, 801-806.
7. Becker, M. and Asch, F. 2005. Iron toxicity in rice- condition and managemen concepts. *Journal of Plant Nutrition. Soil Science*, 168, 558-573.
8. Chatterjee, C., Gopal, R. & Dube, B. K. (2006). Impact of iron stress on biomass, yield, metabolism and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Scientia Horticulturae*, 108(1), 1-6.
9. Che, J., Yamaji, N., Shao, J. F., Ma, J. F. & Shen, R. F. (2016). Silicon decreases both uptake and root-to-shoot translocation of manganese in rice. *Journal of Experimental Botany,* 63, 2411-2420.
10. Collin, B., Doelsch, E. & Keller, C. (2013). Effects of silicon and copper on bamboo grown hydroponically. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 6482-6495.
11. Coolong, T. W., Randle, W. M., Toler, H. D. & Sams, C. M. (2004). Zinc availability in hydroponic culture influences glucosinolate concentrations in *Brassica rapa*. *Hortscience,* 39, 84-86.
12. Da Cunha, K. P. V. & do Nascimento, C. W. A. (2009). Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 197-323.
13. Dong, J., Wu, F. & Zhang, G. (2006). Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). *Plant Physiology and Biochemistry,* 64, 1659-1666.
14. Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,* 50, 641-664.
15. Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., Maftoun, M., Karimian, N & Soltanpour, P. N. (2005). Iron-manganese interaction in chickpea as affected by foliar and soil application of iron in calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 1-9.
16. Kampfenkel, K. & V. Montagu. 1995. Effects of iron excess on Nicotiana plumbaginifolia plants (implications to oxidative stress). *Plant Physiology*, 107, 725-735.
17. Kaya, C., Tuna, L. & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress condition. *Journal of Plant Nutrient*, 29, 1469-1480.
18. Khodarahmi, S. Khoshgoftarmanesh, A. & Mobli, M. (2012). Effect of silicon nutrition on alleviating cadmium toxicity-induced damage on cucumber (*Cucumis sativus* L.) at vegetative stage. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 3(3), 103-110. (In Persian)
19. Kiani Chalmardi, Z. & Abdol Zadeh, A. (2013). Role of silicon in alleviation of iron deficiency and toxicity in hydroponically-grown rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture,* 3(4), 79-89. (In Persian)
20. Levent, T. A., Kaya, C., Higgs, D., Murillo Amador, B., Aydemir, S. & Girgin, A. (2008). Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany,* 62, 10-16.
21. Mehraban, P. Abdol Zadeh, A. and Sadeghipour, H. R. (2008). Iron toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) under different potassium nutrition. *Asian Journal of Plant Sciences*, 7, 251-259.
22. Majerus. V., Bertin, P. & Lutts, S. (2007). Effects of iron toxicity on osmotic potential, osmolytes and polyamines concentrations in the African rice (*Oryza glaberrima* Steud). *Plant Science*, 173, 96-105.
23. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
24. Mehraban, P., Zadeh, A. A. & Sadeghipour, H. R. (2008). Iron toxicity in rice (*Oryza sativa* L.), under different potassium nutrition. *Asian Journal of Plant Science*, 7(3), 251-259.
25. Mohaghegh, P. Shirvani, M. & Ghasemi, S. (2010). Silicon application effects on yield and growth of two cucumber genotypes in hydroponics dystem. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture,* 1(1), 35-40.

26. Moosavi, A. A. & Ronagh, A. (2011). Influence of foliar and soil applications of iron and manganese on soybean dry matter yield and iron-manganese relationship in a Calcareous soil. *Australian Journal of Crop Science,* 5(12), 1550-1556.
27. Nenova, V. 2006. Effect of iron supply ongrowth and photosystem II efficiency of pea plants. General *and* Applied Plant Physiology, (Special issue), 32, 81-90.
28. Neumann, D. & Nieden, U. Z. (2001). Silicon and heavy metals tolerance of higher plants. *Phytochemistry*, 56, 685-692.
29. Okuda, A. & Takahashi, E. (1965). The role of silicon in the Mineral Nutrition of the Rice Plant. Proceeding Symposium of *the International Rice Research Institue*, 123-146.
30. Peyvandi, M., Hamzehzadeh, H. & Hosseini M. M. (2014). Effect of Fe and Nano Fe chelated on micropropagation of olive cv. Dezful. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal,* 4(16), 23-28. (In Persian)
31. Peña-Olmos, J. E., Casierra-Posada, F. and Olmos-Cubides, M. A. 2014. The effect of high iron doses (Fe2+) on the growth of broccoli plants (*Brassica oleracea* var. Italica). *Agronomia Colombiana*, 32(1), 10.
32. Gregory E. W. (2015). *Vegetable Production and Practices*. CABI Press.
33. Ronaghi, A. & Ghasemi-Fasaei, R. (2008). Field evaluations of yield, iron-manganese relationship, and chlorophyll meter readings in soybean genotypesas affected by iron -ethylenediamine di-o-hydroxyphenyl acetic acid in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutreint,* 31, 81-89.
34. Shi, G., Cai, Q., Liu, C. & Wu, L. (2010). Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. *Plant Growth Regulation*, 61, 45-52.
35. Van der Vorm, P. D. G. (1987). Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 18 (11), 1181-1189.
36. Van Der Vorm, P. D. J. & Van Diest, A. (1979). Aspects of the Fe-and Mn nutrition of rice plants. I. Iron-and manganese uptake by rice plants, grown under aerobic and anaerobic conditions. *Plant Soil,* 51, 233-246.
37. Nasiri, Y., Zehtab Salmasi, S., Nasrullah Zadeh, S., Ghassemi Gholezani, K., Najafi, N. & Javanmard, A. (2013). Evaluation of foliar spray of ferrous sulfate and zinc sulfate on yield and nutrients concentration of aerial parts in german chamomile. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production,* 23(3), 105-115. (In Persian)
38. Yousefi, M., Enteshari, S. & Saadatmand, M. (2013). Effects of silica treatment on some morphological, anatomical and physiological characteristics of Iranian borage (*Echium amoenum* Fisch & C.A. Mey). *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*. 5(2), 83-94. (In Persian).
39. Wang, S., Wang, F., Gao, S. & Wang, X. (2016). Heavy metal accumulation in different rice cultivars as influenced by foliar application of nano-silicon. *Water, Air & Soil Pollution*, 227(7), 228.
40. Wu, C., Zou, Q., Xue, S. G., Pan, W. S., Huang, L., Hartley, W. & Wong, M. H. (2016). The effect of silicon on iron plaque formation and arsenic accumulation in rice genotypes with different radial oxygen loss (ROL). *Environmental Pollution*, 212, 27-33.
41. Zhu, Z. G., Wei, G. Q., Li, J., Qian, Q. Q. and Yu, J. Q. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidants enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, 167, 527-533.
42. Zuccarini, P.2008. Effects of silicon on photosynthesis, water relation and nutrient uptake of Phaseolus vulgaris under NaCl stress. *Biologia Plantarum*, 52, 157-160.