

اثر منابع مختلف آهن بر پارامترهای رویشی و فیزیولوژیک دو رقم تجاری گیاه کاهو در آبکشت

حمیدرضا روستا^{۱*} و هادی جعفری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸)

چکیده

آهن یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاه می باشد که در بسیاری از فرایندهای گیاه از جمله فعال کردن آنزیم های دخیل در انتقال الکترون فتوسنتزی و میتوکندری نقش دارد. در این آزمایش، به منظور بررسی و مقایسه اثر منابع مختلف آهن بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک دو رقم کاهو در سیستم هیدروپونیک (لایه نازک محلول غذایی، NFT) آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورها شامل ارقام کاهو (برگی گاردسکو و پیچ گاردسکو) و منابع مختلف آهن (سولفات آهن، Fe-EDDHA و کلات آهن نانو با غلظت آهن یکسان ۲۰ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد که در بین منابع آهن استفاده شده، بهترین عملکرد و پارامترهای فیزیولوژیک (حداکثر عملکرد کوانتومی واکنش فتوشیمیایی فتوسیستم II (Fv/Fm)، شاخص کارایی فتوسنتزی (PI)، قندهای محلول کل، پرولین، کلروفیل a، b، کل و کارتنوئیدها) مربوط به تیمار Fe-EDDHA و کاهوی برگی رقم گاردسکو بود. اما بیشترین میزان جذب عناصر غذایی (آهن، مس، منگنز، نیتروژن و فسفر) به تیمار Fe-EDDHA و کاهوی پیچ رقم گاردسکو تعلق داشت. با توجه به نتایج فوق، کاربرد کلات Fe-EDDHA به عنوان منبع مناسب آهن در کشت هیدروپونیک ارقام کاهوی برگی گاردسکو و پیچ گاردسکو در سیستم بسته NFT توصیه می شود.

کلمات کلیدی: آهن، کاهو، لایه نازک محلول غذایی

مقدمه

یک سیستم مدیریتی قوی، به ویژه در زمینه تغذیه، می باشد (۲). به طور کلی، امروزه ارتباط بین غلظت عناصر غذایی با کیفیت محصول به خوبی مشخص شده و در این زمینه تحقیقات زیادی نیز انجام شده است (۱). آهن یکی از عناصر ضروری و حیاتی برای تمام جانداران محسوب می شود و یکی از عناصری می باشد که در بسیاری از فرایندهای متابولیک نظیر فتوسنتز و تنفس، نقش دارد (۲۶). دسترسی آهن یکی از عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی می باشد و علی رغم اینکه

امروزه، با توجه به محدودیت کمی و کیفی منابع آب و خاک و لزوم تأمین مواد غذایی برای جمعیت رو به رشد کشور، اتخاذ سیاست های جدید در این زمینه ضروری است. بر همین اساس، در سال های گذشته، توجه ویژه ای به تولید محصولات کشاورزی در محیط های کنترل شده، به ویژه نظام های کشت بدون خاک، معطوف شده است. لذا، به منظور تولید محصول با کیفیت مناسب در اینگونه سیستم های کشت، نیاز به اجرای

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: roosta_h@yahoo.com

کاهو در شرایط آبکشت، در این تحقیق، اثر منابع مختلف آهن بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک دو رقم کاهو در سیستم هیدروپونیک لایه نازک محلول غذایی (NFT) - که یک سیستم بسیار معمول برای تولید کاهو است - مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در بهار سال ۱۳۹۳ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان (دمای 22 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت ۵۶٪) به منظور بررسی اثر منابع مختلف آهن بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک دو رقم کاهو در سیستم هیدروپونیک، به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی، اجرا شد. فاکتورها شامل ارقام کاهو (کاهوی برگی گاردسکو و پیچ گاردسکو) و منابع کودی آهن در سه سطح (سولفات آهن، اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید (Fe-EDDHA) و کلات آهن نانو با غلظت یکسان ۲۰ میکرومولار) بودند. روش کار به این صورت بود که بذرها را در گلدان‌های یونولیتی ۴ لیتری حاوی محیط کشت پرلیت، کشت شدند. در هفته اول، بذرها هر روز دو نوبت صبح و عصر با آب دیونیزه آبیاری شدند. با شروع هفته دوم، ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول غذایی (حاوی ۵ میلی‌مولار $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ، ۰/۲ میلی‌مولار KH_2PO_4 ، ۰/۲ میلی‌مولار K_2SO_4 ، ۰/۳ میلی‌مولار $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ و ۰/۱ میلی‌مولار NaCl) جایگزین آب آبیاری شد (۳۸). عناصر کم نیاز عبارت بودند از ۷ میکرومولار $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، ۰/۷ میکرومولار ZnCl_2 ، ۰/۸ میکرومولار $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ، ۲ میکرومولار H_3BO_3 و ۰/۸ میکرومولار $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. پانزده روز پس از جوانه‌زنی، گیاهچه‌ها به بستر اصلی، که گلدان‌های مشبک کوچک پر شده با محیط کشت پرلیت بودند، منتقل شدند. این گلدان‌ها در منافذ کانال‌های سیستم NFT (لایه نازک محلول غذایی) قرار گرفتند. محلول غذایی به‌کار رفته هر هفته تعویض می‌شد. در طول هفته، به‌طور روزانه، pH و هدایت الکتریکی (EC) محلول غذایی با pH متر و EC متر اندازه‌گیری می‌شد و در محدوده

عنصر آهن در بافت خاک به وفور یافت می‌شود ولی به دلیل حالیت کم آن در شرایط قلیایی، گیاه قادر به جذب این عنصر از خاک نیست (۵۱). لذا، کمبود آهن سبب ایجاد اختلالاتی در سیستم فتوسنتزی و کاهش مقدار کلروفیل می‌گردد (۹ و ۳۳). کمبود آهن همچنین باعث کاهش و اختلال در فتوسنتز شده که ارتباط مستقیم با کاهش انتقال الکترون دارد (۴۸). کمبود آهن سبب تغییر در غلظت و جذب برخی عناصر مثل منگنز و روی نیز می‌گردد (۴۴). از طرفی، آهن از مهمترین ترکیبات آنزیم‌های مرتبط با انتقال الکترون مثل سیتوکروم و مراکز سولفور آهن می‌باشد (۴۵). در پژوهش‌های انجام گرفته برای تعیین بهترین منبع جهت جلوگیری از اختلالات کمبود آهن در گیاهان، نتایج متناقضی به‌دست آمده است، به طوری که در یک تحقیق، کاربرد منابع مختلف آهن به‌صورت برگ‌پاشی روی گیاه فلفل نشان داد که پارامترهای رویشی، غلظت عناصر و پارامترهای فوسنتزی تحت تأثیر منابع مختلف آهن قرار گرفت و تیمار کودی سولفات آهن به عنوان منبع کود آهن مناسب محلول پاشی روی گیاه فلفل معرفی شد (۳۶). همچنین، کاربرد آمینوکلات‌های مختلف آهن روی فعالیت آنزیمی و مقدار عناصر بافت گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی متفاوت بود و تیمار کلات گلیسین آهن بهترین نتیجه را در پی داشت (۱۶). ولی کاربرد کودهای مختلف آهن تفاوت معنی‌داری روی خصوصیات رشدی گیاه آفتابگردان و ذرت نداشت (۴۴). همچنین، روش کاربرد عناصر غذایی نیز می‌تواند بر خصوصیات رشدی گیاه مؤثر باشد، به طوری که در پژوهشی، کاربرد کود آهن به دو روش محلول‌پاشی و اضافه کردن به محلول غذایی، تحت شرایط کمبود آهن، روی گیاه توت‌فرنگی نشان داد که در گیاهانی که کود آهن به محلول غذایی اضافه گردید از رشد بهتر و میوه‌هایی با کیفیت بهتر برخوردار بودند (۳۲). همچنین، کاربرد کودهای مختلف آهن به دو روش محلول‌پاشی و اضافه کردن به محیط ریشه سبب تغییر در رشد گیاه اسپاتی‌فیلوم (*Spathyphyllum illusion*) گردید (۲۹). با توجه به اهمیت شناسایی بهترین منبع آهن برای

EC= ۱/۵-۲ و pH= ۶/۵-۷ دسی‌زیمنس بر متر تنظیم می‌شد. همچنین، سیستم NFT در این آزمایش شامل سه سیستم جداگانه بود که هر سیستم دارای دو کانال به طول ۲ متر بود و روی هر کانال، ۸ منفذ کشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داشت. هر رقم در یک کانال از هر سیستم کشت شد. بنابراین، هر سیستم دارای هر دو رقم کاهو بود. میزان آبدهی کانال‌ها وقتی که به مخزن بر می‌گشت تقریباً ۳ لیتر در دقیقه بود. شیب کانال‌ها ۱/۵ درصد بود. اعمال تیمار کودهای آهن در سه سطح (سولفات آهن، EDDHAFE- و آهن نانو) بعد از انتقال نشاها آغاز گردید.

پارامترهای رویشی، فیزیولوژیک، قندهای محلول، پرولین (برگ‌های پیر و جوان) و عناصر غذایی اندازه‌گیری شدند. فلورسانس متغیر به حداکثر (F_v/F_m) و شاخص کارایی دستگاه فتوسنتزی (PI)، با دستگاه Chlorophyll Fluorimeter (مدل Hansatech LTD Pocket PEA) اندازه‌گیری شد. کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئیدها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Spectrometer PG T80 UV/VIS Instruments Ltd. در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر قرائت و سپس محاسبه شد. قندهای محلول با روش ایریگوین و همکاران (۱۹۹۹) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت شد. برای اندازه‌گیری پرولین، ابتدا ۵/۰ گرم برگ بالغ کاهو را با استفاده از ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ در هاون چینی کوبیده و محلول حاصل را در لوله‌ی فالكون ریخته و عمل استخراج دو بار و هر بار با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ تکرار شد. محلول به‌دست آمده، ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفوژ با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد. پس از جداسازی فاز مایع از جامد، قسمت مایع برای استخراج پرولین مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین غلظت پرولین، یک میلی‌لیتر از عصاره‌ی الکلی فوق‌الذکر را با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق نموده و ۵ میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین به آن اضافه شد و پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال به آن و هم زدن دستی به مدت چند ثانیه، محلول به

مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب گرم قرار گرفت. پس از خارج کردن نمونه‌ها از حمام آب گرم و خشک کردن آن‌ها، ۱۰ میلی‌لیتر بنزن به آن‌ها اضافه و با همزن مکانیکی مخلوط شدند تا پرولین وارد فاز بنزن شود. نمونه‌ها ۳۰ دقیقه به حال سکون رها شده و میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل T80 UV/VIS ساخت کشور چین) در طول موج ۵۱۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. عناصر منیزیم، آهن، روی، منگنز، مس و کلسیم توسط دستگاه جذب اتمی (کمپانی استرالیایی، Version 1/33 GBC Avanta) و نیتروژن با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه‌گیری شد. فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر و با اندازه‌گیری میزان جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر به‌دست آمد. آنالیز داده‌های آماری حاصل از این آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام گرفت و مقایسه میانگین تیمارها در سطح احتمال ۵٪ توسط آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

رشد رویشی

نتایج مربوط به صفات عرض، طول و تعداد برگ، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه نشان داد که اثر کود، رقم و اثر متقابل آنها در سطح ۱٪ معنی‌دار گردید. اما در مورد عرض برگ، اثر رقم در هیچیک از سطوح آماری معنی‌دار نشد. همچنین، اثر متقابل کود و رقم بر طول برگ در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار گردید. با توجه به نتایج جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول‌های ۱ و ۲) بیشترین میزان عرض، طول و تعداد برگ، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو و کمترین آن مربوط به تیمار سولفات آهن در کاهوی برگی رقم گاردسکو بود.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که شکل‌های غیر آلی آهن، از جمله سولفات آهن، در pH کمتر از ۵/۵ حلالیت زیاد دارند. ولی با افزایش pH، حلالیت آن‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. ولی در مقابل، شکل‌های کلات شده آهن در pH بیشتر از ۵/۵

جدول ۱. نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر منابع مختلف آهن بر عرض برگ، طول برگ، تعداد برگ و وزن خشک اندام هوایی در دو رقم کاهو

تیمار	عرض برگ (سانتی‌متر)		طول برگ (سانتی‌متر)		تعداد برگ در بوته		وزن خشک اندام هوایی (گرم در گیاه)	
	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی
سولفات آهن	۷/۶۶e	۷/۳۸e	۱۶/۳۸d	۱۸/۸۸c	۹/۶۶e	۱۵/۷۸b	۱/۸۶d	۲/۷۱c
Fe-EDDHA	۱۰/۵۲b	۱۱/۷۷a	۲۰/۰۵bc	۲۵/۲۷a	۱۲/۵۵d	۲۱/۲۱a	۳/۶۸b	۶/۸۹a
کلات آهن نانو	۹/۶c	۸/۷۱d	۱۷/۴۹d	۲۰/۷۲b	۱۲/۸۳cd	۱۴/۹۹bc	۳/۰۹c	۳/۸۲b

حروف متفاوت در هر ستون و برای دو رقم، بیانگر تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است.

صحيح هر يك از كمپلكس‌های زنجیره انتقال الكترون ميتوكندري و فعاليت‌های مرتبط با آن، همبستگی زيادی با كمبود آهن دارند (۴۹). در صورت كمبود آهن، در فعاليت ميتوكندري اختلال ايجاد می‌شود و اين اختلال سبب کاهش توليد ATP و در نهايت انرژی می‌شود و همه‌ی اين عوامل موجب کاهش رشد و عملکرد می‌گردند. از ديگر نقش‌های آهن، كه سبب افزايش رشد رويش می‌شود، تثبيت نيتروژن است. در خيار، مشخص گرديده كه كمبود آهن سبب کاهش ۳۵ درصدی نيترات در برگ‌ها و کاهش ۸۰ درصدی فعاليت نيترات ردوكتاز در هر دو قسمت برگ و ريشه می‌شود (۱۰). نقش مهم ديگر آهن كه سبب افزايش رشد رويش در گیاهان می‌شود، شركت در فتوسنتز است. آهن يك عنصر ضروری در بافت‌های فتوسنتزی است كه در كمپلكس‌های انتقال الكترون نقش دارد (۱۷).

پرولين

نتایج آزمایش در خصوص غلظت پرولين برگ‌های جوان و پير مشخص نمود كه اثر كود، رقم و اثر متقابل كود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گرديد. نتایج مقایسه میانگین بین تیمارها نشان داد كه بیشترین میزان پرولين برگ‌های جوان در تیمار سولفات آهن در کاهوی برگی رقم گاردسکو، کمترین آن در تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، بیشترین

حلاليت آهن را حفظ می‌نمایند (۲۴). در اين آزمایش، كه اثر منابع آهن بر دو رقم کاهوی برگی و پیچ در سیستم NFT مورد مطالعه قرار گرفت، مشخص شد كه در بین تیمارهای FeSO₄، Fe-EDDHA و كلات آهن نانو، بیشترین اثر را Fe-EDDHA داشت، زیرا در اين محدوده pH، Fe-EDDHA حلاليت خود را حفظ کرده و مقدار آهن بیشتری در اختيار گیاه کاهو قرار می‌دهد و در نتیجه سبب افزايش رشد رويش گیاه میگردد. رشد در گیاهان وابسته به رابطه متقابل بین اندام‌های هوایی و ریشه و عوامل بیرونی و درونی تأثیرگذار بر آنها می‌باشد. ترکیباتی كه بتوانند باعث بهبود کارایی اندام‌های گیاهی شوند، در نهايت باعث افزايش رشد و نمو گیاهان می‌شوند. به طور مثال، کاربرد منابع آهن در فلفل موجب افزايش طول ساقه و ریشه و وزن گیاه شد (۳۶). افزايش رشد رويش با کاربرد منابع آهن ارتباط دارد. به طوری كه در گوجه‌فرنگی (۲۲ و ۳۷) و درخت هلو (۶ و ۷) نیز افزايش رشد رويش مشاهده گرديد. یکی از نقش‌های مهم آهن، شركت در ساختار ميتوكندري است. مشاهده شده كه در صورت عدم وجود آهن، سطح برخی از تركيبات حاوی آهن (مانند سيتوكروم‌ها) در درخت چنار کاهش یافته است. كمبود آهن در سلول‌های چنار، باعث شد فعاليت كمپلكس II تحت تأثیر قرار گیرد و كمپلكس‌های I، III، IV و ATP سنتاز فعاليتشان به شدت کاهش يابد (۳۱). در خيار، نشان داده شد كه تعداد يون‌های مورد نیاز برای فعاليت

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به صفات وزن خشک ریشه و پرولین برگ‌های پیر و جوان

پرولین برگ جوان (mg/g fw)		پرولین برگ پیر (mg/g fw)		وزن خشک ریشه (گرم)		تیمار
پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	
گاردسکو	۰/۰۹۷a	گاردسکو	۰/۰۷۹a	گاردسکو	۰/۷۳c	سولفات آهن
گاردسکو	۰/۰۵۲c	گاردسکو	۰/۰۱۹b	گاردسکو	۰/۳۲e	Fe-EDDHA
گاردسکو	۰/۰۲۴e	گاردسکو	۰/۰۰۹d	۲a	۰/۵۳d	کلات آهن نانو
گاردسکو	۰/۰۴۴f	گاردسکو	۰/۰۰۵e	۰/۹۷b	۰/۳۵e	
گاردسکو	۰/۰۶۱b	گاردسکو	۰/۰۱۶c			

حروف متفاوت در هر ستون و برای دو رقم، بیانگر تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است

رنگدانه‌های گیاهی

نتایج مربوط به کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ‌های پیر نشان داد که اثر کود، اثر رقم و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گردید. همچنین، با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو بود (جدول ۳).

نتایج مربوط به کلروفیل a، کلروفیل، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ‌های جوان نشان داد که برای کلروفیل a و کلروفیل کل اثر رقم در هیچیک از سطوح آماری معنی‌دار نگردید. اما اثر کود و اثر متقابل کود و رقم برای تمامی شاخص‌های ذکر شده در بالا در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار شد. همچنین، با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ‌های پیر مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو بود.

تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیایی در گیاهان به وسیله جریان الکترون‌ها و درون دستگاه‌های رنگدانه‌ای انجام می‌گیرد. این رنگدانه‌ها در کلروپلاست‌ها و درون غشاهای تیلاکوئید قرار گرفته‌اند (۲۶). آهن، بخشی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا است و برای سنتز کلروفیل نیز

میزان پرولین برگ‌های پیر در مربوط به تیمار سولفات آهن در کاهوی برگی رقم گاردسکو و کمترین آن مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو بود (جدول ۲). پرولین یکی از اسیدهای آمینه است که در پاسخ به اغلب تنش‌ها در گیاهان تجمع می‌یابد (۲۵). پژوهشگران چند دلیل را برای تجمع پرولین در گیاهان تحت شرایط تنش بیان کردند. برخی بیوستز ABA در ریشه و انتقال آن به قسمت‌های هوایی گیاه را به عنوان سیگنالی برای تجمع پرولین می‌دانند و برخی نیز عقیده دارند که پراکسید هیدروژن تولید شده در طول تنش، سیگنالی برای تجمع پرولین است (۱۸ و ۴۷). تحت تنش شوری، یکی از تهدیدهای واقعی برای کلروپلاست، تولید رادیکال‌های هیدروکسیلی است که برای مهار آن در تیلاکوئید آهن کاتالیز می‌شود و سبب کاهش فعالیت H_2O_2 می‌گردد (۱۲). بیان شده است که در پاسخ به کمبود آهن، ABA در ریشه ساخته می‌شود (۲۳، ۳۵ و ۴۰). حال، با توجه به گفته‌های فوق، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت کمبود آهن، ABA و H_2O_2 در گیاه ساخته می‌شوند و سبب تولید سیگنال‌های تجمع پرولین می‌گردند. در آزمایش حاضر، بیشترین میزان پرولین تولید شده مربوط به تیمار $FeSO_4$ بود که مشخص گردید در مقایسه با سایر تیمارها، این تیمار از نظر انتقال آهن به گیاه به دلیل کاهش حلالیت نسبت به کلات‌های آهن ضعیف‌تر عمل کرده و گیاه با تنش کمبود آهن بیشتری مواجه بوده است.

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به صفات کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید برگ پیر

تیمار	کلروفیل a (mg/g, fw)		کلروفیل b (mg/g, fw)		کلروفیل کل (mg/g, fw)		کارتنوئید (mg/g, fw)	
	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ
سولفات آهن	۰/۰۳۲e	۰/۰۴۶c	۰/۰۱۸c	۰/۰۲۷b	۰/۰۵۱d	۰/۰۷۳c	۰/۰۲۵f	۰/۰۳۷e
Fe-EDDHA	۰/۰۹۲a	۰/۰۶۹b	۰/۰۴۹e	۰/۰۱۷cd	۰/۰۱۴a	۰/۰۸۶b	۰/۰۵۵a	۰/۰۵۲b
کلات آهن نانو	۰/۰۳۹d	۰/۰۳۳e	۰/۰۱۳d	۰/۰۰۵e	۰/۰۵۳d	۰/۰۳۸e	۰/۰۴۳c	۰/۰۳d

حروف متفاوت در هر ستون و برای دو رقم، بیانگر تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به صفات کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید برگ جوان

تیمار	کلروفیل a (mg/g, fw)		کلروفیل b (mg/g, fw)		کلروفیل کل (mg/g, fw)		کارتنوئید (mg/g, fw)	
	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ	برگی	پیچ
سولفات آهن	۰/۰۸۲a	۰/۰۶۶b	۰/۰۵۱b	۰/۰۳۶c	۰/۰۱۲a	۰/۱b	۰/۰۱۷d	۰/۰۲۴c
Fe-EDDHA	۰/۰۸۲a	۰/۰۷۲ab	۰/۰۵۸a	۰/۰۴۴b	۰/۱۳a	۰/۱۱ab	۰/۰۴۹a	۰/۰۳۶b
کلات آهن نانو	۰/۰۴۵c	۰/۰۵۴c	۰/۰۱۷d	۰/۰۲۳d	۰/۰۶۳c	۰/۰۷۸c	۰/۰۱۹cd	۰/۰۱۸d

حروف متفاوت در هر ستون و برای دو رقم، بیانگر تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است.

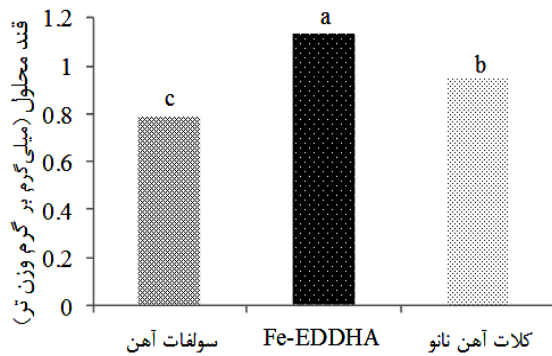
به دلیل حلالیت بهتر این کلات آهن، مقدار آهن بیشتری در اختیار گیاه کاهو قرار گرفت و سبب بهبود شرایط فتوسنتزی و تولید بهتر رنگدانه‌های گیاهی شد. نتایج این پژوهش با نتایج روستا و محسنیان (۳۶) روی فلفل، نعنای (۳۰) و هلو (۱۵) مطابقت داشت.

قندهای محلول

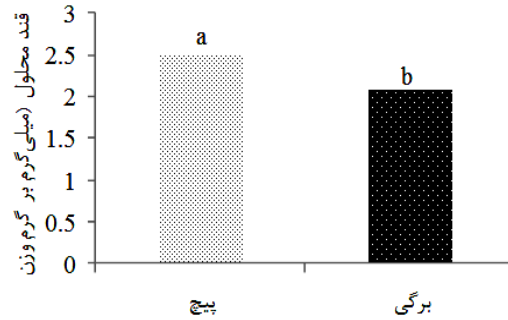
نتایج آزمایش در خصوص قندهای محلول برگ‌های جوان و پیر نشان داد که در برگ‌های جوان، اثر رقم و در برگ‌های پیر، اثر کود در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار گردید. اما اثر متقابل کود و رقم در هیچیک از سطوح آماری معنی‌دار نشد. همچنین، نتایج بین تیمارها (شکل ۱) نشان داد که بیشترین میزان قندهای

مورد نیاز است. آهن خود جزیی از مولکول کلروفیل نیست. ولی، نیاز به آهن احتمالاً مربوط به نیاز عمومی به این عنصر برای سنتز اجزای کلروپلاست، به‌ویژه پروتئین‌های انتقال الکترون، است. کمبود آهن، همواره موجب از بین رفتن همزمان کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست می‌شود (۳).

کارتنوئیدها گروهی از ملکول‌های بزرگ ایزوپروپونوئیدی و اغلب از هیدروکربن‌ها هستند و در چربی محلول بوده و در غشای کلروپلاست یا پلاستیدهای تخصصی به‌نام کروموپلاست یافت می‌شوند. از آنجایی که آهن سبب حفظ ساختمان کلروپلاست می‌گردد، وجود آهن باعث افزایش ساخت کارتنوئید در گیاهان می‌شود (۳). در این آزمایش، بیشترین میزان کلروفیل و کارتنوئید مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود که



شکل ۲. اثر منابع مختلف کود آهن بر قندهای محلول برگ‌های پیر کاهو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ می‌باشد



شکل ۱. اثر رقم بر غلظت قندهای محلول برگ‌های جوان کاهوی پیچ و برگ‌ی گاردسکو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد

محدوده pH آزمایش حاضر، میزان دسترسی گیاه به آهن افزایش یافت و با توجه به موارد ذکر شده در بالا، شرایط تولید قند، در نتیجه بهبود فتوسنتز، افزایش یافت.

پارامترهای فتوسنتزی

نسب فلورسانس کلروفیل متغیر به حداکثر (F_v/F_m)

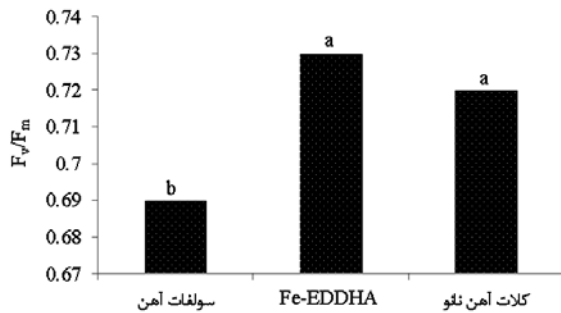
نتایج صفت F_v/F_m برگ‌های پیر و جوان مشخص نمود که اثر کود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گردید. ولی اثر متقابل کود و رقم در هیچیک از سطوح معنی‌دار نشد. به طوری که مقایسه میانگین بین تیمارها نشان داد که حداکثر میزان F_v/F_m برگ‌های پیر برای رقم (شکل ۳) مربوط به کاهوی برگ‌ی رقم گاردسکو و برای کود (شکل ۴) متعلق به تیمار Fe-EDDHA و همچنین در مورد برگ‌های جوان، بیشترین میزان F_v/F_m برای رقم (شکل ۵) مربوط به کاهوی برگ‌ی رقم گاردسکو و برای کود متعلق به تیمار Fe-EDDHA بود (شکل ۶).

شاخص کارایی دستگاه فتوسنتزی (PI)

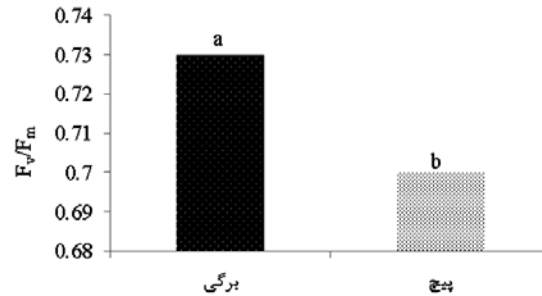
در رابطه با صفت PI برگ‌های پیر و جوان نشان داده شد که اثر کود و رقم و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گردید. با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین

محلول برگ‌های جوان مربوط به کاهوی پیچ رقم گاردسکو و بیشترین میزان قندهای محلول برگ‌های جوان (شکل ۲) مربوط به Fe-EDDHA بود.

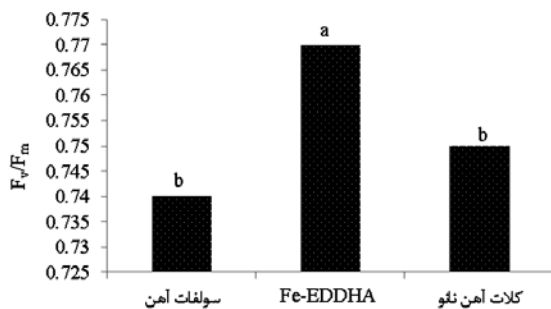
قندها محصول اصلی فتوسنتز می‌باشند و منبع تأمین انرژی برای بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک گیاه محسوب می‌شوند (۵۲). آهن در سنتز کلروفیل نقش دارد و کلروفیل نیز برای فتوسنتز ضروری می‌باشد. در میان فرایندهای مختلف فتوسنتز، فتوسیستم II حساسیت بیشتری به کمبود آهن نسبت به فتوسیستم I دارد، زیرا کمبود آهن باعث تخریب و تجزیه روتئین D1 که در مرکز واکنش فتوسیستم II قرار دارد و همچنین پروتئین‌هایی که در سطح تیلاکوئید قرار دارند، می‌شود و با توجه به نقش آهن در فعالیت آنزیم روبیسکو (ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز) که به طور مستقیم بر بیان ژن این آنزیم دخیل است و نقش مهمی که این آنزیم در سیکل کربن و فتوسنتز در گیاهان سه‌کربنه دارد و بخش عمده پروتئین کلروپلاست را این آنزیم تشکیل می‌دهد، کمبود این عنصر با کاهش فتوسنتز همراه است (۹). در آزمایش انجام شده در برگ‌های جوان، بین منابع آهن تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. ولی در برگ‌های پیر، بیشترین میزان قند مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود و به دلیل پایداری این کلات در



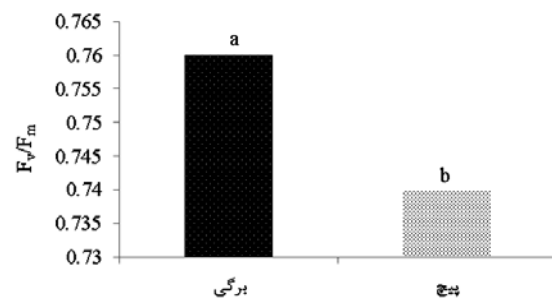
شکل ۴. اثر منابع مختلف کود آهن بر F_v/F_m برگ‌های پیر کاهو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد



شکل ۳. اثر رقم بر F_v/F_m برگ‌های پیر کاهوی پیچ و برگ‌ی گاردسکو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد



شکل ۶. اثر منابع مختلف کود آهن بر F_v/F_m برگ‌های جوان کاهو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد



شکل ۵. اثر رقم بر F_v/F_m برگ‌های جوان کاهوی پیچ و برگ‌ی گاردسکو حروف متفاوت در روی ستون‌ها نشانه‌ی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد

ویژگی‌های مربوط به آن است. انرژی نور جذب شده در مولکول کلروفیل، به صورت‌های مختلفی مصرف می‌شود (۴۲). استفاده از فلورسانس کلروفیل یک روش قابل اعتماد و غیرمخرب برای نشان دادن وضعیت فتوسنتزی گیاه و قضاوت در مورد وضعیت فیزیولوژیک آن می‌باشد (۳۴). نسبت F_v/F_m حداکثر عملکرد کوانتومی واکنش فتوشیمیایی فتوسیستم II را نشان می‌دهد و یک پارامتر مهم برای تعیین وضعیت دستگاه فتوسنتزی می‌باشد (۲۷). شاخص کارایی فتوسنتزی (PI) یکی از شاخص‌های مهم فتوسنتز می‌باشد که عملکرد هر دو فتوسیستم I و II را بازتاب نموده و اطلاعات کمی راجع به

میزان PI برگ‌های پیر در بین تیمارها مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگ‌ی رقم گاردسکو و کمترین آن مربوط به تیمار سولفات آهن در کاهوی پیچ رقم گاردسکو و در برگ‌های جوان نیز بیشترین میزان در بین تیمارها مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگ‌ی رقم گاردسکو و کمترین آن مربوط به تیمار کلات آهن نانو در کاهوی پیچ رقم گاردسکو بود (جدول ۵).

یکی از دلایل فیزیولوژیک کاهش رشد، ممکن است اختلال در سیستم فتوسنتز گیاه باشد. از جمله راه‌های مطالعه و شناسایی اختلالات در فتوسنتز، بررسی فلورسانس کلروفیل و

گاردسکو و بیشترین میزان نیتروژن ریشه مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو بود (جداول ۶، ۷ و ۸).

یک همبستگی مثبت بین آهن و فسفر وجود دارد و کمبود فسفر می‌تواند در نتیجه کمبود آهن باشد (۵۳). در گیاه آرابیدوپسیس نشان داده شده است که کمبود فسفر به دلیل انتقال آهن به کلروپلاست بوده و پس از آن با بیان فریتین تنظیم شده است (۱۹). بنابراین، اسید فیتیک که یک منبع فسفات است، احتمالاً می‌تواند سبب آزاد شدن آهن از فیتات ذخیره شده درون فیتین شود و باعث کاهش فقر آهن گردد (۱۱، ۱۳ و ۲۸). طی پژوهشی، مشخص شد که کاربرد برگی نیتروژن سبب افزایش میزان آهن گردید (۴). کمبود آهن سبب کاهش ۳۵ درصدی میزان نیتروژن در برگ‌های خیار شده است (۱۰). به تازگی نشان داده شده است که کاربرد آهن در هنگام کمبود نیتروژن سبب افزایش میزان نیتروژن شده است (۴۱). IRT1 مسئول حمل Fe^{2+} جذب شده از ناحیه اپیدرمی ریشه از محلول خاک در گیاهان غیر از خانواده گرامینه است (۴۶). IRT1 نه تنها در هنگام کمبود آهن، بلکه در زمان بیش از حدی روی در محیط رشد باعث تنظیم و پاسخ به کمبود آهن می‌شود (۸). آهن اپیدرم غشای پلاسمایی به وسیله IRT1 انتقال می‌یابد و وظیفه اصلی آن انتقال Fe^{2+} است؛ ولی سبب انتقال Zn^{2+} نیز می‌شود. بین جذب آهن و روی رقابت وجود و در شرایطی که آهن کمتری جذب شود گیاه می‌تواند روی را بهتر جذب نماید. مس به عنوان یک کوفاکتور برای تعدادی از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا انجام وظیفه می‌کند. این آنزیم‌ها شامل ناقل الکترون فتوسنتزی یعنی پلاستوسیانین، سیتوکروم اکسیداز، که آخرین آنزیم اکسیداز در تنفس میتوکندری است و اسید اسکوربیک اکسیداز می‌باشند.

مگنز به عنوان یک کوفاکتور برای تعدادی از آنزیم‌ها، به ویژه دکربوکسیلاز و دهیدروژناز، که در چرخه تنفسی کربن نقش حیاتی ایفا می‌کند، مورد نیاز است. شناخته شده‌ترین وظیفه این عنصر آزاد شدن اکسیژن فتوسنتزی است (۳). نتایج این

عملکرد گیاه تحت شرایط تنش ارائه می‌دهد (۴۳). فتوسیستم I و II هر دو حاوی پروتئین‌های آهن‌دار می‌باشد که آهن در فتوسیستم II برای شکستن آب مهم است (۲۰). در نتیجه، کمبود آهن ممکن است منجر به کاهش فعالیت فتوسیستم II شود. نتایج این تحقیق با نتایج روی گلابی (۵ و ۷) و هلو (۱۴) یکسان بود.

عناصر غذایی اندام هوایی و ریشه

نتایج پژوهش انجام شده در خصوص عناصر آهن، منگنز، مس، روی و فسفر اندام هوایی نشان داد که اثر کود و رقم در سطح آماری ۱٪ و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار گردید. با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان آهن اندام هوایی مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، منگنز مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، مس مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، روی مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو، فسفر مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو و فسفر ریشه، اثر کود و رقم در سطح آماری ۱٪ و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۵٪ و برای عناصر مس، منگنز و نیتروژن نشان داد که اثر کود و رقم و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گردید. با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان نیتروژن اندام هوایی مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی برگی رقم گاردسکو بود. همچنین، در خصوص آهن، روی و فسفر ریشه، اثر کود و رقم در سطح آماری ۱٪ و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۵٪ و برای عناصر مس، منگنز و نیتروژن نشان داد که اثر کود و رقم و اثر متقابل کود و رقم در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار گردید. بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین میزان آهن ریشه مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، منگنز مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، مس مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، روی مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم گاردسکو، فسفر مربوط به تیمار Fe-EDDHA در کاهوی پیچ رقم

فلفل (۳۶) و ذرت (۵۰) مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، مشخص شد که استفاده از Fe-EDDHA، در مقایسه با سولفات آهن و کلات آهن نانو باعث افزایش پارامترهای رویشی مثل طول برگ، تعداد برگ عرض برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، تجمع قندهای محلول، کاهش تولید پرولین و همچنین جذب بهتر عناصر غذایی شد.

پژوهش نشان داد که آهن بر جذب هر دو عنصر مس و منگنز اثر مثبت دارد و با افزایش آهن مقدار این دو عنصر نیز افزایش می‌یابد. در بین تیمارهای اعمال شده، بیشترین میزان جذب عناصر فسفر، آهن، نیتروژن، مس و منگنز مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود که به دلیل جذب بهتر توسط گیاه و رابطه مستقیمی که با جذب عناصر ذکر شده داشت سبب فراهم شدن شرایط بهتر برای جذب این عناصر شد. اما بیشترین میزان جذب عنصر روی مربوط به تیمار سولفات آهن بود، که دلیل این امر در بالا مورد بحث قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر در مورد عناصر ذکر شده، با نتایج در مورد گوجه‌فرنگی (۳۹ و ۱۶)،

منابع مورد استفاده

۱. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۹. مباحث پیشرفته در تغذیه گیاه. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳۸۸ صفحه.
۲. ملکوتی، م. ج. و م. بنی غیبی. ۱۳۷۹. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی مؤثر در خاک، گیاه و میوه در راستای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات استراتژیک کشور. چاپ دوم، نشر آموزش کشاورزی، کرج.
۳. هاپکینز، و. ج. ۱۳۸۶. مقدمه‌ای بر فیزیولوژی گیاهی. ترجمه احمدی، م. پ. احسان زاده و ف. جباری، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۵۱ صفحه.
4. Aciksoz, S.B., A. Yazici, L. Ozturk and I. Cakmak. 2011. Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. *Int. J. Plant Soil Sci.* 349: 215-225.
5. Alvarez-Fernandez, A., S. Garcia-Marco and J.J. Lucena. 2005. Evaluation of synthetic iron (III) chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to correct iron chlorosis. *Eur. J. Agron.* 22: 119-130.
6. Alvarez-Fernandez, A., J. Abadia and A. Abadia. 2006. Iron deficiency, fruit yield and quality. PP. 85-101. *In: Barton, L.L. and J. Abadia (Eds.), Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms.* Springer, Dordrecht, The Netherlands.
7. Alvarez-Fernandez, A., P. Garcia-Lavina, J. Fidalgo, J. Abadia and A. Abadia. 2004. Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Int. J. Plant Soil Sci.* 263: 5-15.
8. Becher, M., N. Talke, L. Krall and U. Kramer. 2003. Cross-species microarray transcript profiling reveals high constitutive expression of metal homeostasis genes in shoots of the zinc hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant J.* 37(2): 251-268.
9. Bertamini, M., N. Nedunchezian and B. Borghi. 2001. Effect of iron deficiency induced changes in photosynthetic pigments, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase, and photosystem activities in field grown grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaves. *Photosynthetica* 39: 59-65.
10. Borlotti, A., G. Viganì and G. Zocchi. 2012. Iron deficiency affects nitrogen metabolism in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *BMC Plant Biol.* 12: 189-195.
11. Bregitzer, P. and V. Raboy. 2006. Effects of four independent low-phytate mutations on barley agronomic performance. *J. Agron. Crop Sci.* 46: 1318-1322.
12. Dat, J., S. Vandenneele, E. Vranova, M. Van Montagu, D. Inze and F. Van Breusegem. 2000. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cell. Mol. Life Sci.* 57: 779-795.
13. Drakakaki, G., S. Marcel, R.P. Glahn, E.K. Lund, S. Pariagh and R. Fischer. 2005. Endosperm-specific co-expression of recombinant soybean ferritin and *Aspergillus* phytase in maize results in significant increases in the levels of bioavailable iron. *Plant Mol. Biol.* 59: 869-880.

14. Eichert, T., J.J. Peguero-Pina, E. Gil-Pelegrin, A. Heredia and V. Fernandez. 2010. Effects of iron chlorosis and iron resupply on leaf xylem architecture, water relations, gas exchange and stomatal performance of field-grown peach (*Prunus persica*). *J. Plant Physiol.* 138: 48-59.
15. Fernandez, V., V. Rio, J. Abadia and A. Abadia. 2006. Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* L.): Effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. *Int. J. Plant Soil Sci.* 289: 239-252.
16. Ghasemi, S., A.H. Khoshgoftarmanesh, M. Afyuni and H. Hadazadeh. 2014. Iron(II)-amino acid chelates alleviate salt-stress induced oxidative damages on tomato grown in nutrient solution culture. *Sci. Hort.* 165: 91-98.
17. Guerinot, M.L. and Y. Yi. 1994. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol.* 104: 815-820.
18. Hare, P.D., W.A. Cress and J. van Straden. 1999. Proline synthesis and degradation: A model system for elucidating stress-related signal transduction. *Exp. Bot.* 50: 413-434.
19. Hirsch, J., E. Marin, M. Floriani, S. Chiarenza, P. Richaud and L. Nussaume. 2006. Phosphate deficiency promotes modification of iron distribution in Arabidopsis plants. *Biol. J.* 88: 1767-1771.
20. Hulsebosch, R.J., A.J. Hoff and V.A. Shuvalov. 1996. Influence of KF, DCMU and removal of Ca^{2+} on the light-spin EPR signal of the cytochrome b-559 Fe(III) ligated by OH^- in chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta-Bioener.* 1277: 103-106.
21. Irigoyen J.J., D.W. Emerich, M. Sanchez-Diaz. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiol. Plant.* 84: 55-60.
22. Kaya, C., D. Higgs and M. Burton. 1999. Foliar application of iron as remedy for zinc toxic tomato plants. *J. Plant Nutr.* 22(12): 1829-1837.
23. Landsberg, E.C. 1996. Hormonal regulation of iron-stress response in sunflower roots: A morphological and cytological investigation. *Protoplasma* 194: 69-80.
24. Lindsay, W.L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. The Blackburn Press, Caldwell, NJ.
25. Mahajan, S. and N. Tuteja. 2005. Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Arch. Biochem. Biophys.* 444: 139-158.
26. Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
27. Maxwell, K. and G.N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence, a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51(345): 659-668.
28. Mendoza, C., E. Viteri, B. Lonnerdal, K.A. Young, V. Raboy and K.H. Brown. 1998. Effect of genetically modified, low-phytic acid maize on absorption of iron from tortillas. *Am. J. Clin. Nutr.* 68: 1123-1127.
29. Mohamadipour, R., S. Sedaghatpour and A.M. Khomami. 2013. Effect of application of iron fertilizers in two methods 'foliar and soil application' on growth characteristics of *Spathyphyllum illusion*. *Eur. J. Exp. Biol.* 3(1): 232-240.
30. Pande, P., S. Chand, A. Pandey and D.D. Patra. 2011. Effect of sole and conjoint application of iron and manganese on herb yield, nutrient uptake, oil quality *vis-à-vis* their optimal level in spearmint (*Mentha spicata* Linn. emend. Nathh. cv. Arka). *Ind. J. Nat. Prod. Resour.* 2(2): 242-249.
31. Pascal, N. and R. Douce. 1993. Effect of iron deficiency on the respiration of sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) calls. *J. Plant Physiol.* 103: 1329-1338.
32. Pestana, M., P.J. Correia, T. Saavedra, F. Gama and A. Abadia. 2012. Amarilis de Varennes development and recovery of iron deficiency by iron resupply to roots or leaves of strawberry plants. *Plant Physiol. Biol.* 53: 1-5.
33. Pestana, M., P.J. Correia, A. de-Varennes, J. Abadia and E.A. Faria. 2001. Effectiveness of different foliar iron applications to control iron chlorosis in orange trees grown on a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 24(5): 613-622.
34. Rizza, F., D. Pagani, A.M. Stanca and L. Cattivelli. 2001. Use of chlorophyll fluorescence to evaluate the cold acclimation and freezing tolerance of winter and spring oats. *Afr. J. Agric. Res.* 120: 389-396.
35. Romera, F.J. and E. Alcantara. 1994. Iron-deficiency stress responses in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots: A possible role for ethylene? *J. Plant Physiol.* 105: 1133-1138.
36. Roosta, H.R. and Y. Mohsenian. 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Sci. Hort.* 146: 182-191.
37. Roosta, H.R. and M. Hamidpour. 2011. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci. Hort.* 129: 396-402.
38. Roosta H.R. and J.K. Schjoerring. 2007. Effects of ammonium toxicity on nitrogen metabolism and elemental profile of cucumber plants. *J. Plant Nutr.* 30: 1933-1951.
39. Satti, S.M.E. and R.A. Al-Yahyai. 1995. Salinity tolerance in tomato: Implications of potassium, calcium, and phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26(17-18): 2749-2760.
40. Schmidt, W. and M. Bartels. 1996. Formation of root epidermal transfer cells in *Plantago*. *J. Plant Physiol.* 110: 217-225.
41. Shi, R., G. Weber, J. Koster, M. Reza-Hajirezaei, C. Zou and F. Zhang. 2012. Senescence-induced iron mobilization in source leaves of barley (*Hordeum vulgare*) plants. *New Phytol.* 195: 372-383.

42. Soltani, A. 2004. Chlorophyll Fluorescence and Its Application. Internal Press, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
43. Strasser, R.J., A. Srivastava and M. Tsimilli-Michael. 2000. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. PP. 445-483. *In: Yunus, M., U. Pathre and P. Mohanty. (Eds.), Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation*, Taylor and Francis, London.
44. Tagliavini, M., J. Abadia, D. Rombola, A. Abadia, C. Tsipouridis and B. Marangoni. 2000. Agronomic means for the control of iron chlorosis in deciduous fruit plants. *J. Plant Nutr.* 23: 2007-2022.
45. Taiz, L. and E. Zeiger. 1998. Assimilation of mineral nutrients. PP. 323-345. *In: Plant Physiology*, 2nd Edition, Sinauer Assoc. Inc., Publishers, Sunderland, MA.
46. Verslues, P.E., S. Kim and K. Zhu. 2007. Altered ABA, proline and hydrogen peroxide in an arabidopsis glutamate: Glyoxylate aminotransferase mutant. *Plant Mol. Biol.* 64: 205-217.
47. Vert, G. 2002. IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *Plant Cell J.* 14(6): 1223-1233.
48. Vert, G., N. Grotz, F. Dedaldechamp, F. Gaymard, M.L. Guerinot, J.F. Briat and C. Curie. 2002. IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and plant growth. *Plant Cell J.* 14: 1223-1233.
49. Vigani, G., D. Maffi and G. Zocchi. 2009. Iron availability affects the function of mitochondria in cucumber root. *New Phytol.* 182: 127-136.
50. Wang, X. and Q.S. Cai. 2006. Steel slag as an iron fertilizer for corn growth and soil. *J. Plant Physiol.* 123: 421-427.
51. Welch, R.M., W.H. Allaway, W.A. House and I. Kubota. 1991. Geographic distribution of trace element problems. *In: Mordvedt, J.J., F.R. Cox, L.M. Shuman and R.M. Welch (Eds.), Micronutrients in Agriculture*, 2nd Edition, SSSA Book Series, Madison, WI, USA.
52. Werner, T., K. Holst, Y. Pors, A. Guivarch, A. Mustroph, D. Chriqui, B. Grimm and T. Schmulling. 2008. Cytokinin deficiency causes distinct changes of sink and source parameters in tobacco shoots and roots. *J. Exp. Bot.* 59: 2659-2672.
53. Zheng, L., F. Huang, R. Narsai, J. Wu, E. Giraud and F. He. 2009. Physiological and transcriptome analysis of iron and phosphorus interaction in rice seedlings. *J. Plant Physiol.* 151: 262-274.