مقایسه کارآیی منابع مختلف آهن بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیک کاهو در شرایط قلیائی در سیستم هیدروپونیک

میثم منظری توکلی[۱]، واحد باقری[۱*] و حمیدرضا روستا[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۵)

چکیده

به منظور بررسی اثر منابع متفاوت آهن تحت شرایط تنش بی‌کربنات سدیم بر عملکرد گیاه کاهو، یک آزمایش گلخانه‌ای با دو فاکتور شامل منبع آهن در سه شکل (Fe-EDDHA، نانوکلات آهن و نانوفرتایل) و بی‌کربنات سدیم در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌مولار) با سه تکرار انجام پذیرفت. پس از سه هفته رشد، دانهال‌ها به مدت ۳۰ روز تحت تأثیر تیمار بی‌کربنات سدیم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که وزن خشک اندام هوایی و ریشه با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم به طور معنی‌داری کاهش یافت. در پاسخ به افزایش بی‌کربنات سدیم، محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و حداکثر بازدهی محصول کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m) در تمام منابع آهن کاهش نشان دادند. این در حالی بود که کمترین کاهش این ویژگی‌ها در گیاهانی رخ داد که با کود آهن Fe-EDDHA تغذیه شده بودند. تنش بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار غلظت آهن در اندام هوایی و ریشه گردید. به طوری که میزان آهن در اندام هوایی گیاهان، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، در تیمار نانوفرتایل، ۶۴/۸۸ درصد نسبت به شاهد کاهش نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، Fe-EDDHA به‌دلیل حلالیت و فراهمی بیشتر در محلول، دارای قابلیت بیشتری برای جذب توسط کاهو بوده که در نتیجه موجب افزایش رشد کاهو شد. بنابراین، با توجه به اهمیت آهن در تغذیه گیاه، مصرف کود Fe-EDDHA در شرایط قلیائیت بهترین منبع تأمین آهن برای کاهو شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: قلیائیت، کلات آهن، عناصر غذایی

مقدمه

یکی از روش‌های کاشت گیاهان در گلخانه‌ها، استفاده از سیستم آبکشت (هیدروپونیک) است. یکی از مزایای سیستم آبکشت که باعث مورد توجه قرار گرفتن این روش کاشت توسط تولیدکنندگان سبزی‌های گلخانه‌ای شده، افزایش کارآیی مصرف آب است (۱۵). درجه قلیائیت آب به عنوان یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت آب، به دلیل اثر شدید آن بر pH خاک یا محلول محیط رشد، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (۱۱). عوامل اصلی که باعث قلیائیت می‌شوند شامل بی‌کربنات‌ها (HCO_3^-) و کربنات‌ها (CO_3^{2-}) هستند.

کمبود آهن در گیاه ممکن است به دلیل کمبود آهن قابل دسترس در اثر غلظت زیاد بی‌کربنات ناشی از pH زیاد باشد (به ازای هر یک واحد افزایش pH، حلالیت یون آهن سه ظرفیتی هزار برابر کاهش می‌یابد) (۱۹). مکانیسم‌های مختلف نشان می‌دهند که بی‌کربنات، کلروز آهن را تحریک می‌کند. برای مثال، از جذب آهن و انتقال آن به برگ‌ها جلوگیری نموده (۲۲) و آهن را در برگ‌ها غیر متحرک می‌کند (۲۳). بنابراین، بی‌کربنات باعث کاهش غلظت آهن در ماده خشک برگ می‌شود.

همچنین، یک رابطه مثبت بین کلروفیل و غلظت آهن کل در برگ‌های بالایی گیاه وجود دارد. هر چند که در موارد متعدد

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

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vahed1360@yahoo.com

این وابستگی دیده نشده و غلظت زیاد آهن در برگ‌های جوان کلروز شده در مقایسه با برگ‌های سبز دیده شده است، که این پدیده را ناسازگاری کلروزی (Chlorosis paradox) می‌نامند (۲۳). این ناسازگاری ممکن است در نتیجه غیر فعال شدن آهن در آپوپلاست برگ (۲۳) یا در اثر غلیظ شدن آن بر اثر کاهش ماده‌سازی و کوچکی برگ باشد (۵).

لوسنا و همکاران (۱۸) گزارش کردند که قابلیت دسترسی به آهن خاک برای ریشه گیاهان عموماً در خاک‌های قلیایی به‌خاطر pH زیاد آنها و غلظت‌های زیاد بی‌کربنات است، که حلالیت آهن را کم می‌کند، بی‌کربنات ممکن است بر توزیع یون آهن در قسمت‌های مختلف گیاه تأثیر بگذارد (۲۶). pH زیاد باعث مختل شدن ریداکتاز آهن سه ظرفیتی می‌شود. بنابراین، نقل و انتقال آهن در سرتاسر پلاسمالما کاهش می‌یابد (۲). از طرفی، آهن از مهمترین ترکیبات آنزیم‌های مرتبط با انتقال الکترون مثل سیتوکروم، پروتئین و سولفور آهن می‌باشد (۲۷).

در پژوهش‌های انجام گرفته برای تعیین بهترین منبع جهت جلوگیری از کلروز آهن در گیاهان نتایج متناقضی به‌دست آمده است. در آزمایشی، اثر سه منبع مهم آهن به صورت محلول-پاشی روی گیاه فلفل تحت شرایط قلیایی در محیط آکواپونیک مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان دو مرتبه در ماه با چهار تیمار مختلف آهن شامل: آب مقطر به عنوان شاهد، FeSO4، Fe-EDDHA و Fe-EDTA که حاوی ۰/۵ گرم در لیتر آهن بودند، محلول‌پاشی شدند. نتایج نشان داد که رشد رویشی گیاهان با محلول‌پاشی آهن به شدت تحت تأثیر قرار گرفت و افزایش نشان داد، به طوری که بهترین نتیجه با سولفات آهن به‌دست آمد. همچنین، بهترین نتیجه برای پارامترهایی مانند SPAD، Fv/Fm و PI با سولفات آهن و بعد از آن با Fe-EDDHA گزارش شد (۲۴). در مطالعات متعدد، بر اهمیت کلات آهن در کشاورزی و پرورش گیاهان جهت جلوگیری از کلروز آهن تأکید شده است. برتامینی و همکاران (۶) گزارش کردند که کلات آهن (Fe-EDDHA) در بسیاری از محصولات در pH زیاد باعث جلوگیری از کلروز آهن می‌شود. یلیواینیو و همکاران (۳۰) گزارش کردند که کاربرد خاکی کلات‌ها (Fe-EDDHA و Fe-EDTA) در مقایسه با FeSO4 تحت شرایط قلیایی در گیاه کاهو باعث افزایش غلظت آهن و عملکرد گیاه شد. همچنین، در این آزمایش، Fe-EDDHA باعث افزایش غلظت مس و کاهش غلظت روی در گیاه کاهو شد. همین‌طور در آزمایش دیگری روی گیاهان آفتابگردان و ذرت، بین گیاهان تیمار شده با Fe-EDDHA و Fe-EDTA تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (۱۲).

آهن در سنتز کلروفیل نقش دارد و کلروفیل نیز برای فتوسنتز ضروری می‌باشد. در میان فرایندهای مختلف فتوسنتز، فتوسیستم ۲ حساسیت بیشتری به کمبود آهن نسبت به فتوسیستم ۱ دارد، زیرا کمبود آهن باعث تخریب و تجزیه پروتئین D1 که در مرکز واکنش فتوسیستم ۲ قرار دارد و پروتئین‌هایی که در سطح تیلاکوئید قرار دارند، می‌شود (۶). همچنین، 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 سه کربنه دارد و بخش عمده پروتئین کلروپلاست را این آنزیم تشکیل می‌دهد، کمبود این عنصر با کاهش فتوسنتز همراه است (۶).

کلات کلمه‌ای یونانی و اصطلاحی شناخته شده در علم شیمی به معنای چنگال است که عنصری مانند آهن را در بر می‌گیرد و باعث می‌شود در شرایط مختلف و نامطلوب محیطی مانند شوری و pH زیاد خاک، این عنصر در خاک رسوب نکند و به طور فعال در اختیار گیاه قرار گیرد (۳۰). در ایران، به علت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش تبخیر آب‌های سطحی به علت افزایش دما، در آینده نزدیک ناگزیر به استفاده از آب‌های با کیفیت نامطلوب در کشاورزی و حتی کشت هیدروپونیک خواهیم بود. آب‌های با کیفیت نامناسب اغلب pH زیاد دارند که باعث اختلال در فرایند جذب آهن می‌شود. از آنجایی که بر اساس اطلاعات منتشر شده، پژوهشی در مورد اثر منابع مختلف آهن بر کاهو در شرایط قلیائیت در سیستم

هیدروپونیک انجام نشده است، پژوهش حاضر با هدف تعیین بهترین منبع آهن برای کاهو در شرایط قلیائیت در سیستم هیدروپونیک صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

کاشت بذرها و محلول‌دهی

این پژوهش روی گیاه کاهو (Lactuca sativa L.) در گلخانه‌ی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان انجام شد. گیاهان در بستر هیدروپونیک با محیط کشت پرلایت کشت شدند و بعد از مرحله ۴ برگی به سطل‌های ۴ لیتری حاوی محلول غذایی منتقل شدند. این محلول غذایی حاوی ۵ میلی‌مولار $Ca(NO_3)_2.4H_2O$، ۰/۲ میلی‌مولار KH_2PO_4، ۰/۲ میلی‌مولار K_2SO_4، ۰/۳ میلی‌مولار $MgSO_4.7H_2O$ ، ۰/۱ میلی‌مولار NaCl ، ۷ میکرومولار $MnSO_4.H_2O$، ۰/۷ میکرومولار $ZnCl_2$، ۰/۸ میکرومولار $CuSO_4.5H_2O$، ۲ میکرومولار H_3BO_3، و ۰/۸ میکرومولار $Na_2MoO_4.2H_2O$ بود (۲۵). جهت تأمین آهن از ۳ منبع متفاوت آهن (به میزان ۰/۵ mg Fe/L) شامل کلات آهن (Fe-EDDHA)، نانوکلات آهن خضرا و نانوفرتایل استفاده شد. کلات آهن (Fe-EDDHA)، نانو کود خضرا و کود نانوفرتایل به ترتیب حاوی ۶٪، ۹٪ و ۱/۸۹٪ آهن بودند. محلول گلدان‌ها هر دو هفته یک‌بار تعویض شد. بعد از گذشت ۳ هفته، تیمارهای بی‌کربنات در سه سطح مختلف (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم) به مدت یک ماه اعمال گردیدند.

ویژگی‌های رویشی

در پایان آزمایش، برای اندازه‌گیری وزن خشک، ابتدا هر گیاه از گلدان بیرون آورده و به دو قسمت اندام هوایی و ریشه تقسیم شد و پس از شستشوی سیستم ریشه‌ای و خشک شدن، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس توزین شدند.

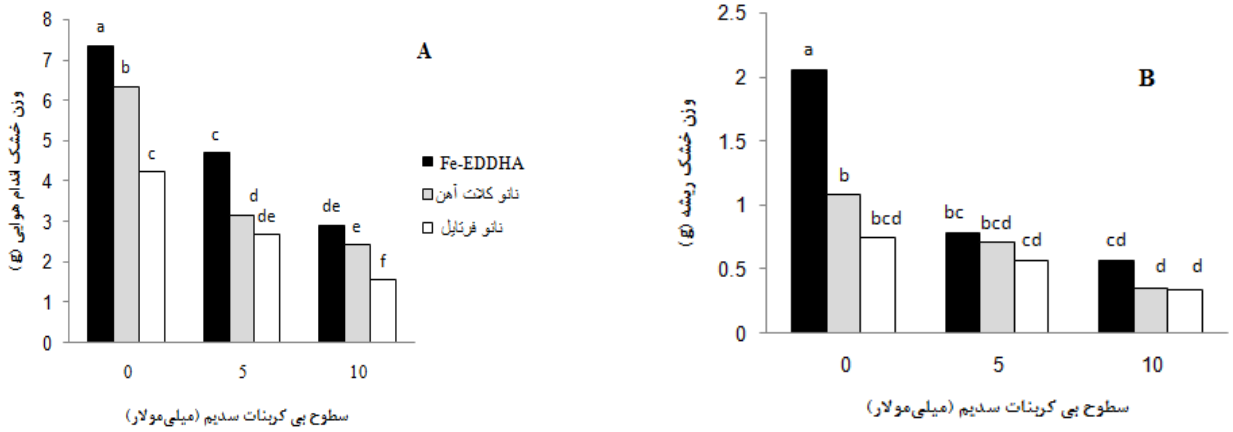
پارامترهای فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل از دستگاه Chlorophyll Fluorimeter (مدل Pocket PEA، کمپانی Hansatech ساخت کشور انگلستان) استفاده گردید. این دستگاه، میزان فلورسانس کلروفیل را بر اساس پارامتر Fv/Fm ثبت نمود. روش کار بدین صورت بود که از هر گلدان چهار برگ بالغ از گیاه انتخاب و در گیره‌های مخصوص جهت ایجاد شرایط تاریکی به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و پس از این مدت میزان فلورسانس کلروفیل ثبت گردید. برای اندازه‌گیری کلروفیل a و b ابتدا ۰/۲۵ گرم برگ تازه خرد و در یک هاون چینی سرد با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ سائیده شد تا به صورت توده یکنواختی درآید. سپس، مخلوط حاصل در لوله‌های فالکون ۲۰ میلی‌لیتر ریخته شده و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۳۵۰۰ سانتریفیوژ گردید. میزان جذب نور محلول رویی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل T80 UV/VIS ساخت کشور چین) در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر قرائت گردید (۱۶).

عناصر غذایی

عناصر غذایی که در این آزمایش اندازه‌گیری شد شامل پتاسیم، منیزیم، آهن و روی در اندام هوایی و ریشه بودند. برای تهیه عصاره، ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه خشک شده و آسیاب شده توزین و در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت قرار داده شد تا تبدیل به خاکستر شدند. سپس، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال، به هر نمونه اضافه گردید و در نهایت توسط آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. این عصاره به طور مستقیم جهت اندازه‌گیری عناصر ذکر شده به‌کار رفت. عناصر منیزیم، آهن و روی بعد از عصاره‌گیری با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل GBC avanta ساخت کشور استرالیا) و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد.

این پژوهش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور منبع آهن و بی‌کربنات سدیم در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار



شکل ۱. اثر متقابل سطوح بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر وزن خشک بخش هوایی (A) و ریشه (B) در گیاه کاهو. حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪ آزمون دانکن است.

انجام پذیرفت. داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری MSTAT-C تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن ($p<0/05$) انجام گردید. با استفاده از برنامه MINITAB نسخه ۱۴ آزمون نرمال بودن روی داده‌ها انجام شد.

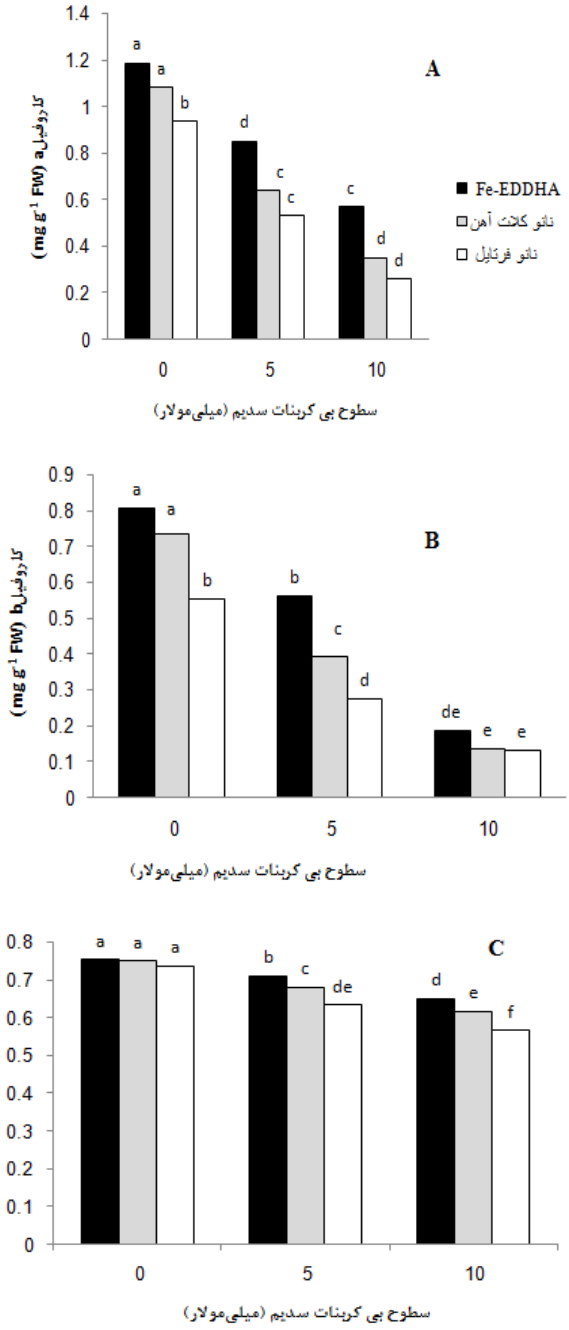
نتایج و بحث

پارامترهای رویشی

نتایج تأثیر بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه کاهو در شکل ۱ ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، صرف‌نظر از نوع منبع آهن به‌کار رفته، افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم به طور معنی‌داری باعث کاهش وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه کاهو گردید. در مورد منابع آهن، بیشترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه در سطوح مختلف بی‌کربنات سدیم در تیمار مربوط به مصرف کود Fe-EDDHA مشاهده شد، به طوری که بیشترین وزن خشک بخش هوایی در سطح ۱۰ میلی‌مولار کود Fe-EDDHA با ۸۷٪ افزایش نسبت به کود نانوفرتایل به‌دست آمد (شکل ۱). به طور کلی، اغلب اثرهای قلیائیت بر رشد گیاه از طریق کاهش در قابلیت حل عناصر توسط افزایش pH، که به علت یون بی‌کربنات است، ایجاد می‌شود (۱). گاهی اوقات کاهش رشد را به سرعت کم فتوسنتز، که تحت غلظت زیاد بی‌کربنات اتفاق می‌افتد، نسبت می‌دهند که با انتقال کم آهن و یا با غیر قابل حل کردن آهن در محلول محیط کشت، که باعث صدمه به سنتز کلروفیل می‌شود، همراه است (۵). کود Fe-EDDHA در مقایسه با بقیه کلات‌ها در محلولهای قلیائی (pH =۱۱) پایدار می‌باشد و قادر است عنصر آهن را آزاد کند. از آنجایی که این عنصر در ساختمان فتوسنتزی نقش به‌سزایی دارد باعث افزایش عملکرد می‌شود. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش با نتایج دلا گواردیا و آلکانتارا (۹) و بی و همکاران (۷) مطابقت دارد.

رنگدانه‌های گیاهی و فلورسانس کلروفیل

بر اساس نتایج به‌دست آمده (شکل ۲- A و ۲- B)، بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌داری در کلروفیل a و کلروفیل b در تمام سطوح منابع آهن شد. به طوری که بیشترین کاهش مربوط به سطح ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم بود. اما در همین سطح از بی‌کربنات سدیم، بیشترین میزان آهن در گیاهان تغذیه شده با کود Fe-EDDHA مشاهده شد. هر چند که درمورد کلروفیل b اختلافی بین سطوح منابع آهن مشاهد نگردید (شکل ۲- B). نتایج تأثیر بی‌کربنات سدیم بر نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به حداکثر در تقابل با منابع آهن در شکل ۲-C آورده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، صرف‌نظر از نوع



شکل ۲. اثر متقابل سطوح بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر کلروفیل a (A)، کلروفیل b (B) و F_v/F_m (C) در گیاه کاهو. حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪ آزمون دانکن است.

منابع آهن به کار رفته، تیمار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش فلورسانس کلروفیل گردید، به طوری که این شاخص در تیمار نانوکلات آهن و در سطح ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم نسبت به شاهد (صفر میلی‌مولار) ۳۰٪ کاهش نشان داد.

در مورد اثر متقابل بی‌کربنات سدیم و منابع آهن، کمترین میزان کاهش در فلورسانس کلروفیل در سطح ۱۰میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم و کود Fe-EDDHA و بیشترین کاهش در تیمار کود نانوفرتایل مشاهده شد. بر اساس گزارش‌های موجود، کلروپلاست و رنگدانه‌های گیاهی موجود در آن تحت تنش قلیائیت قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، تنش قلیائیت از طریق افزایش غلظت یون بی‌کربنات و افزایش pH باعث تخریب کلروپلاست و در نتیجه کاهش مقدار کلروفیل a و b می‌شود (۲۹). میزان کلروفیل گیاه ذرت نیز تحت تنش شوری- قلیائیت کاهش پیدا کرد. این کاهش به آنزیم کلروفیلاز، که باعث تجزیه کلروفیل و در نتیجه آسیب به دستگاه فتوسنتزی می‌شود، نسبت داده شده است (۱۰).

فلورسانس کلروفیل یکی از راه‌های مصرف انرژی برانگیختگی در فتوسنتز است که به طور گسترده‌ای در تحقیقات فتوسنتز مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، از فلورسانس کلروفیل برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و میزان آسیب وارده به دستگاه فتوسنتزی استفاده شده است. به طور خاص، کاهش عملکرد کوآنتومی توسط بازدارندگی نور می‌تواند توسط پارامتر فلورسانس متغیر به حداکثر (Fv/Fm) مورد ارزیابی قرار گیرد. اگر گیاهی نتواند انرژی بیش از حد خورشید را فلورسانس کند انرژی بیش از حد از طریق کلروفیل به اکسیژن منتقل شده و باعث خسارت فتواکسیداتیو می‌شود. علائم اولیه چنین خسارتی در پروتئین D1 در فتوسیستم نوری ۲ ظاهر می‌شود و منجر به تخریب غشاها و اکسیداسیون کلروفیل می‌گردد (۱۴). در این پژوهش، مقدار Fv/Fm در تمام گیاهان کمتر از ۰/۸ گزارش شد که می‌تواند به علت عدم توسعه کامل دستگاه فتوسنتزی در نتیجه کشت در شرایط گلخانه باشد. تحقیقات نشان می‌دهند که تحت مقادیر زیاد شوری- قلیائیت، کاهش فعالیت فتوشیمیایی و تخریب دستگاه فتوسنتزی رخ می‌دهد (۱۰). در این آزمایش، نتایج بهتری در

جدول ۱. مقایسه میانگین غلظت عناصر منیزیم، پتاسیم، آهن و روی در اندام هوایی و ریشه کاهو در سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم

سطح بی‌کربنات سدیم (mM)	منبع آهن	منیزیم (درصد وزن خشک)		پتاسیم (درصد وزن خشک)		آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	
		اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
۰	Fe-EDDHA	a۱/۲۴	۱/۱۲a	۱/۳۲a	۰/۸۳a	۲۷۵/۸a	۶۱۰/۰a	۲۱/۳۰a	۲۱/۰۷ab
	نانوکلات آهن	۱/۰۹b	۰/۹۸ab	۱/۲۰ab	۰/۸۱a	۲۷۱/۳a	۵۵۱/۰ab	۱۵/۳۷bcd	۱۷/۶۰abc
	نانوفرتایل	۰/۸۵bc	۰/۸۴bc	۱/۱۷b	۰/۶۶ab	۲۷۱/۱a	۵۰۳/۵b	۱۵/۴۷bcd	۱۶/۴۳bc
۵	Fe-EDDHA	۰/۹۲bc	۰/۷۸cd	۰/۹۱c	۰/۶۰abc	۲۰۲/۶b	۴۸۲/۲b	۱۹/۶۳ed	۲۲/۶۰a
	نانوکلات آهن	۰/۷۵c	۰/۶۱de	۰/۶۴d	۰/۴۵bcd	۱۶۵/۳c	۳۸۵/۵c	۱۷/۲۰abc	۱۷/۷۳abc
	نانوفرتایل	۰/۵۹d	۰/۵۴e	۰/۴۵e	۰/۴۷bcd	۱۴۰/۳d	۳۳۵/۴cd	۱۲/۷۷de	۲۲/۳۷ab
۱۰	Fe-EDDHA	۰/۴۶ef	۰/۵۱e	۰/۴۰e	۰/۳۷cd	۱۲۵/۹e	۲۹۲/۱d	۱۵/۰۷cd	۱۶/۹۳abc
	نانوکلات آهن	۰/۴۵fg	۰/۲۸f	۰/۳۲ef	۰/۴۲bcd	۱۱۵/۶e	۲۷۴/۶d	۱۱/۸۷de	۱۲/۰۳c
	نانوفرتایل	۰/۲۹g	۰/۱۴f	۰/۲۲f	۰/۲۶d	۹۵/۲f	۱۸۸/۳e	۱۰/۲۴e	۱۲/۰۰c

حروف متفاوت در هر ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار تیمارها در سطح ۵٪ آزمون دانکن است.

اثر کاربرد کود Fe-EDDHA نسبت به بقیه منابع آهن به کار رفته مشاهده شد. دلیل این موضوع را می‌توان به کارآیی زیاد کود Fe-EDDHA در شرایط قلیایی دانست، به طوری که در سطح ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، کلات آهن بدون تشکیل کمپلکس با عناصر قلیایی، آهن را آزاد کرده و در اختیار گیاه قرار می‌دهد. آهن به طور مستقیم در چرخه فتوسنتز گیاه دخالت دارد و تولید مواد غذایی هم با افزایش بازده فتوسنتز در ارتباط است. اگر چه تولید موادغذایی به فاکتورهای دیگری هم بستگی دارد، اما اگر فتوسنتز گیاه افزایش پیدا کند تولید مواد غذایی نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

عناصر غذایی

نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱) نشان داد که با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، غلظت پتاسیم در اندام هوایی و ریشه صرف‌نظر از نوع منبع آهن به‌کار رفته کاهش یافت. برهمکنش بی‌کربنات سدیم و منابع آهن نیز بر میزان پتاسیم در اندام هوایی معنی‌دار شد، به طوری که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بیشترین غلظت پتاسیم در گیاهان تغذیه شده با کود Fe-EDDHA مشاهده شد (جدول ۱).

در ارتباط با عنصر منیزیم، نتایج نشان داد که با افزایش بی‌کربنات سدیم، غلظت منیزیم در گیاه کاهش یافت و کمترین میزان منیزیم در تیمار کود نانوفرتایل مشاهده شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که صرف‌نظر از نوع منبع آهن به‌کار رفته، تنش بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار غلظت آهن در اندام هوایی و ریشه کاهو گردید، به طوری که میزان آهن اندام هوایی گیاهان در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در تیمار نانوفرتایل ۶۴/۸۸ درصد نسبت به شاهد کاهش نشان داد. در ارتباط با منبع آهن نتایج نشان داد که بیشترین کاهش غلظت آهن اندام هوایی در تیمار نانوفرتایل و کمترین کاهش در تیمار Fe-EDDHA مشاهده شد (جدول ۱).

در مورد عنصر روی، روند مشابهی با عنصر آهن مشاهده شد (جدول ۱). افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم (تنش قلیائیت) موجب بروز نارسایی‌های تغذیه‌ای در گیاه می‌شود و در نتیجه شرایط نامساعدی برای رشد و نمو گیاه ایجاد می‌گردد. این نارسایی‌ها ممکن است به دلیل اثرهای منفی pH زیاد در اثر افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم بر قابلیت جذب و انتقال عناصر غذایی در بخش‌های مختلف گیاه و یا مربوط به وجود یون سدیم در رقابت با جذب عناصر در گیاه باشد. pH بهینه

برای قابلیت حل عناصر ریزمغذی بین ۵/۸-۶/۴ است (۴). در این پژوهش، بی‌کربنات سدیم بر جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف تأثیرگذار بود (جدول ۳). pH آپوپلاست برگ نیز یک فاکتور خیلی مهم در کنترل قابلیت در دسترس بودن عناصری از قبیل فسفر، آهن، منگنز، مس و روی در برگ است. بی‌کربنات نیز نقش مهمی در تغییر pH آپوپلاست برگ دارد.

به طور کلی، کاهش در غلظت عناصر غذایی تحت تأثیر بی‌کربنات می‌تواند به علت کاهش در دسترس بودن عناصر غذایی در خاک‌های با pH زیاد باشد (۱ و ۲). در تیمار بی‌کربنات سدیم، به علت رقابت بین سدیم و پتاسیم، میزان غلظت پتاسیم در اندام هوایی و ریشه گیاه سپیدار کاهش یافت (۱۷) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. در بین تمام عناصر کم‌مصرف، گیاهان بیشترین نیاز را به آهن دارند. تحت شرایط قلیائیت با pH زیاد، آهن به آهن اکسید شده که نسبتاً برای گیاه غیر قابل دسترس است دسترس می‌شود. به ازای هر واحد افزایش pH ، قابل دسترس بودن Fe^{3+} و Fe^{2+} برای گیاه به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۰۰ برابر کاهش می‌یابد (۲۱). تیسون و همکاران (۲۸) گزارش دادند که افزایش pH قابلیت دسترسی روی، منگنز و آهن را در گیاه خیار به علت رسوب یا عدم جذب آنها کاهش می‌دهد.

در ارتباط با نقش بی‌کربنات بر عناصر آهن و روی، نتایج نشان داد که تیمار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش آهن و روی در اندام هوایی شد، که با نتایج چلیک و همکاران (۸) مطابقت دارد. در این پژوهش، ریشه‌ها غلظت زیادی از عناصر از جمله آهن و روی نسبت به اندام هوایی دارند که شاید به علت تجمع این عناصر در آپوپلاست ریشه در اثر افزایش pH و رسوب عناصر میکرو باشد که با نتایج دلا گواردیا و آلکانتارا (۹) مطابقت دارد. قلیائیت، حلالیت آهن را به سبب افزایش pH مرتبط با مصرف H^+ به‌وسیله HCO_3^- کاهش می‌دهد، به‌طوری که تحت این شرایط گستره فراهمی آهن حدود ۱۰-۰/۱ درصد نیاز طبیعی برای رشد مطلوب گیاه است (۲۹). در ارتباط با تأثیر بر جذب عناصر توسط گیاه ، کود Fe-EDDHA بهترین نتیجه را داد. بنابراین با توجه به نتایج پژوهش حاضر، کمبود آهن در گیاه تحت تنش قلیائیت را می‌توان تا حدی با مصرف کلات آهن (Fe-EDDHA) جبران کرد. یلیواینیو و همکاران (۳۰) نیز گزارش کردند که کاربرد خاکی کلات آهن (Fe-EDDHA) در کاهو تحت شرایط قلیایی باعث جلوگیری از کلروز آهن می‌شود. همچنین، آلوارز فرناندز و همکاران (۳) گزارش کردند که در خاک‌های آهکی کلات آهن (Fe-EDDHA) مؤثرترین ماده برای برطرف کردن کمبود آهن در گوجه‌فرنگی است.

کلات، یک کمپلکس پایدار متشکل از یک یون فلزی و یک مولکول آلی (کلاتگر) است. به دلیل تمایل زیادی که عامل کلاتگر به یون‌های فلزی دارد، کمپلکس‌ها از پایداری قابل توجهی برخوردارند. اما فلز برای جذب به وسیله گیاه باید از کلات خارج شود (۱۳). با توجه به نتایج به‌دست آمده، Fe-EDDHA به‌دلیل حلالیت و پایداری بیشتر در محلول، دارای قابلیت بیشتری برای جذب توسط کاهو بوده و در نتیجه موجب افزایش رشد کاهو می‌شود. بنابراین، با توجه به اهمیت آهن در تغذیه گیاه، مصرف کود Fe-EDDHA در شرایط قلیائیت بهترین منبع تأمین آهن برای کاهو می‌باشد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، بی‌کربنات سدیم (تنش قلیائیت) موجب کاهش عملکرد و غلظت عناصر غذایی در گیاه کاهو گردید. نتایج همچنین نشان داد که در بین سه منبع آهن مورد استفاده بیشترین کارآیی در سطوح تنش مربوط به کود Fe-EDDHA بود. نانوکلات آهن، که یک کود ساخت ایران است، در سطوح تنش عملکرد بهتری نسبت به نانوفرتایل، که یک کود خارجی است، داشت.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان به خاطر حمایت مالی این پژوهش، شرکت خضرا به دلیل تأمین کود نانوکلات آهن و گروه علوم باغبانی دانشگاه ولی‌عصر (عج) به‌خاطر استفاده از گلخانه‌ی هیدروپونیک برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

1. Ahmad, P. and S. Sharma. 2010. Physio-biochemical attributes in two cultivars of mulberry (*Morus alba* L.) under $NaHCO_3$ stress. Int. J. Plant Produc. 4: 1735-1743.
2. Alcantara, E., F.J. Romera and M.D. De la Guardia. 1988. Genotypic differences in bicarbonate-induced iron chlorosis in sunflower. J. Plant Nutr. 11: 65-67.
3. Álvarez-Fernández, A., A. Gárate, M. Juárez and J.J. Lucena. 1996. Tomato acquisition of iron chelates in a calcareous sandy substrate. J. Plant Nutr. 19(8/9): 1279-1293.
4. Argo, W. and P. Fisher. 2007. pH and Micronutrient Management in Container Grown Crops. OFA Bulletin, No. 905.
5. Bavaresco, L., E. Giachino and R. Colla. 1999. Iron chlorosis paradox in grapevine. J. Plant Nutr. 22: 1589-1597.
6. Bertamini, M., N. Nedunchezhian 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. cv. Pinot noir) leaves. Photosynthetica 39: 59-65.
7. Bie, Z., I. Tadashi and Y. Shinohara. 2004. Effects of sodium sulfate and sodium bicarbonate on the growth, gas exchange and mineral composition of lettuce. HortSci. 99: 215-224.
8. Celik, H., A. Vahap Kakal and H. Basat. 2006. Effect of bicarbonate induced iron chlorosis on selected nutrient contents and nutrient ratio of shoots and roots of different maize varieties. J. Agron. 5: 369-374.
9. De la Guardia, M.D. and E. Alcantara. 2002. Bicarbonate and low iron level increase root to total plant weight ratio in olive and peach rootstock. J. Plant Nutr. 25: 1021-1032.
10. Deng, C.N., G.X. Zhang, X.L. Pan and K.Y. Zhao. 2010. Chlorophyll fluorescence and gas exchange responses of maize seedlings to saline-alkaline stress. Bulgarian J. Agric. Sci. 16(1): 49-58.
11. Handreck, K. and N. Black. 2002. Growing Media for Ornamental Plants and Turf. UNSW Press, Sydney, Australia.
12. Hernández-Apaolaza, L., A. Gárate and J.J. Lucena. 1995. Efficacy of commercial Fe(III)-EDDHA and Fe(III)-EDDHMA chelates to supply iron to sunflower and corn seedlings. J. Plant Nutr. 18(6): 1209-1223.
13. Hopkins, W.G. 1999. Introduction to Plant Physiology. 2nd Ed., Panima Educational Book Agency, New Delhi.
14. Johnson, J.D., R. Tognetti and P. Paris. 2002. Water relations and gas exchange in poplar and willow under water stress and elevated atmospheric CO_2. Physiol. Plant. 115: 93-100.
15. Jones, J.B. 2005. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower. CRC Press, Boca Raton, FL.
16. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and cartenoids: Pigments and photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol. 148: 350-382.
17. Lu, S., S. Zhang, X. Xu, H. Korpelainen and C. Li. 2009. Effect of increased alkalinity on Na^+ and K^+ contents, lipid peroxidation and antioxidative enzymes in two populations of *Papulus cathatana*. Biol. Plant. 53: 597-600.
18. Lucena, C.F.J., C.L. Romera, M.J. Rojas, F. Garcia, E. Alcantara and R. Perez-Vicente. 2007. Bicarbonate blocks the expression of several genes involved in the physiological responses to Fe deficiency of strategy I plants. Funct. Plant Biol. 34: 1002-1009.
19. Lucena, J.J. 2000. Effects of bicarbonate, nitrate and other environmental factors on iron deficiency chlorosis: A review. J. Plant Nutr. 23(11-12): 1591-1606.
20. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London.
21. Nikolic, M. and V. Romheld. 2002. Does high bicarbonate supply to roots change availability of iron in the leaf apoplast? Plant Soil 241: 67-74.
22. Romera, F.J., E. Alcantara and M.D. De la Guardia. 1992. Effects of bicarbonate, phosphate and high pH on the reducing capacity of Fe-deficient sunflower and cucumber plants. J. Plant Nutr. 15: 1519-1530.
23. Romheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. J. Plant Nutr. 23: 1629-1643.
24. 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.
25. Roosta, H.R. and J.K. Schjoerring. 2007. Effects of ammonium toxicity on nitrogen metabolism and elemental profile of cucumber (*Cucumis sativus* L., cv. Styx) plants. J. Plant Nutr. 30: 1933-1951.
26. Tagliavini, M. and A.D. Rombola. 2001. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems– A review. Eur. J. Agron. 15: 71-92.
27. Taiz, L. and E. Zeiger. 1998. Assimilation of mineral nutrients. PP. 323-345. *In:* Plant Physiology, 2nd Edition, Sinauer Assoc., Inc. Publishers, Sunderland, MA.
28. Tyson, R.V., E.H. Simonne, D.D. Treadwell, M. Davis and J.M. White. 2008. Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recalculating hydroponics. J. Plant Nutr. 31: 2018-2030.

29. Valdez-Aguilar, L.A. 2004. Effect of alkalinity in irrigation water on selected greenhouse ornamental plants. PhD Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas.
30. Ylivainio, K., A. Jaakkola and R. Aksela. 2004. Effect of Fe compounds on nutrient uptake by plants grown in sand media with different pH. J. Plant Nutr. Soil Sci. 167: 602-608.