

اثر متقابل بی‌کربنات سدیم و منابع مختلف آهن بر غلظت عناصر کم‌مصرف در گیاه فلفل دلمه‌ای

محمد پورا بر ایمی^۱، حمیدرضا روستا^{۱*} و محسن حمیدپور^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲)

چکیده

برای بررسی اثر منابع مختلف آهن بر غلظت عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه آهن، در گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) رقم کالیفرنیا واندر، در شرایط قلیایی در سیستم هیدروپونیک، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی شامل دو فاکتور بی‌کربنات سدیم در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار) و چهار نوع کود آهن (FeSO_4 ، Fe-EDTA، Fe-DTPA و Fe-EDDHA) همگی در غلظت ۱۰ میکرومولار و با سه تکرار اجرا شد. طبق نتایج به‌دست آمده، بی‌کربنات سدیم باعث کاهش میزان آهن، منگنز، روی و مس و افزایش میزان سدیم شد. با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، بر خلاف کاهش رشد و کلروز شدیدی که گیاهان در تیمار سولفات آهن نشان دادند، میزان آهن در این تیمار در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در مقایسه با تیمارهای کی‌لیت آهن تفاوت معنی‌داری نداشت و حتی در مواردی بیشتر هم بود. در حضور بی‌کربنات و در تیمار سولفات آهن، غلظت عناصر منگنز، روی و مس گیاه بیشتر از کی‌لیت‌ها بود که احتمالاً به‌علت کاهش رقابت آهن با این عناصر در تیمار سولفات آهن بوده است. بنابراین، اگرچه استفاده از کی‌لیت‌های آهن و به‌ویژه Fe-EDDHA برای تأمین آهن در شرایط قلیایی توصیه می‌شود، ولی غلظت‌های زیاد آن ممکن است باعث کمبود عناصر منگنز، روی و مس در گیاه شود.

واژه‌های کلیدی: سولفات آهن، قلیانیت، کی‌لیت آهن، هیدروپونیک

مقدمه

به شکل NaHCO_3 ، کاهش رشد و کلروز گزارش شده است (۳۰). ممانعت رشد ریشه یکی از نخستین فاکتورهای اثرگذار قابل مشاهده بی‌کربنات در چغندر قند است (۱۰). ارتفاع گیاه، وزن خشک برگ، وزن خشک شاخه و قطر ساقه گل جعفری تحت تأثیر شوری و pH قلیایی کاهش یافت (۳۷). مهمترین عارضه فیزیولوژیک ناشی از بالا بودن غلظت بی‌کربنات در محیط ریشه، اختلال در تغذیه آهن می‌باشد. این اختلال فیزیولوژیک ممکن است در سطح جذب، انتقال، متابولیسم یا

بی‌کربنات یکی از مهمترین عوامل قلیانیت آب آبیاری است (۳۱). نتایج بررسی‌ها در ایران نشان می‌دهد که ۸۶ درصد آب‌های آبیاری دارای قلیانیت زیاد هستند (۲). غلظت یون بی‌کربنات (HCO_3^-) یکی از معیارهای مورد ارزیابی در رابطه با کیفیت آب آبیاری است. حضور این یون در آب آبیاری آثار نامطلوبی بر رشد گیاه دارد (۱). در تنباکو، رقم CVKY-907، در کشت محلول با بیش از ۲ میلی‌مولار بی‌کربنات (فراهم شده

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

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

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

در تحقیقی، پاسخ دو رقم نخود فرنگی به کمبود مستقیم و غیرمستقیم آهن بررسی شد. نتایج نشان داد که کمبود آهن ناشی از بی‌کربنات اگرچه یک کاهش کمتر در غلظت آهن بافت برگ را سبب می‌شد ولی یک محدودیت چندین برابری نسبت به کمبود مستقیم آهن روی خیلی از پارامترها داشت (۲۴).

در گیاهان خیار کشت شده در سیستم هیدروپونیک، هنگامی که pH افزایش یافت، آهن و منگنز موجود در محلول غذایی و آهن و منگنز موجود در ماده خشک بخش هوایی، کم شدند (۳۶). گونه‌های گیاهی و ارقام درون گونه‌ای، در پاسخ به تنش HCO_3^- تفاوت نشان می‌دهند. هم‌چنین، نوع بستر، روش آبیاری و نوع کود، تحمل گونه‌های گیاهی به HCO_3^- را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۷).

منع آهن به‌کار برده شده جهت یک محصول می‌تواند با توجه به دامنه pH تغییر پیدا کند. برای مثال، در بستر پیت، هنگامی که pH کمتر از ۵/۵ است، منابع غیرآلی آهن از قبیل $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ و اکسید آهن (Fe_2O_3) به‌طور زیادی می‌توانند محلول باشند. اما هنگامی که pH بستر افزایش می‌یابد حلالیتشان به سرعت کاهش می‌یابد (۲۱). در مقابل، مواد کی‌لیت‌کننده آهن می‌توانند حلالیت آهن را در دامنه‌های وسیعی از pH حفظ کنند، که منتج به حذف نشانه‌های کمبود آهن در گیاهان رشد کرده در pH بالا می‌شود (۲۱). نتایج تحقیقات متعدد نشان داده که Fe-EDDHA (Ferric ethylenediaminedi(0-hydroxyphenylacetic)acid یک کود آهن مؤثر جهت خاک‌های آهکی است و یک کی‌لیت پایدار در محدوده pH ۹-۴ می‌باشد (۱۵).

بنابراین، با توجه به اینکه مهمترین عارضه فیزیولوژیک ناشی از زیاد بودن غلظت بی‌کربنات در محیط ریشه اختلال در تغذیه آهن می‌باشد (۱) و قلیائیت آب آبیاری نیز باعث کاهش قابلیت فراهمی عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه آهن، در گیاه می‌شود (۱۸)، در این تحقیق اثر منابع مختلف آهن بر غلظت آهن و سایر عناصر کم‌مصرف در فلفل دلمه‌ای در شرایط قلیائی بررسی گردید.

مجموعه‌ای از آنها اتفاق افتد (۱). کمبود آهن یک عارضه شایع است که در خیلی از نواحی جهان رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به‌طور عمده با pH و آهکی بودن خاک در ارتباط است. کمبود آهن در گیاه اهمیت اقتصادی دارد. چون کیفیت محصول و عملکرد می‌تواند شدیداً تحت تأثیر قرار گیرد (۵). در تحقیقی روی گیاه مو مشخص شد که کمبود آهن ناشی از بی‌کربنات تأثیر نامناسبی بر تولید زیست‌توده گیاهی، طول شاخه، محتوای کلروفیل و غلظت آهن داشت، که هم به غلظت بی‌کربنات و هم به ژنوتیپ مربوط می‌شد (۲۰). آهن به‌دلیل اینکه در فرآیندهای فیزیولوژیک متعدد از قبیل فتوسنتز، تنفس، سنتز DNA و تشکیل هورمون نقش دارد، در تغذیه گیاه ضروری است (۳۲). از وظایف مهم آهن، توانایی آن در تغییر ظرفیت شیمیایی است. آهن برای بیوسنتز کلروفیل نیز ضروری است. در شرایط کمبود آهن، حجم کلروپلاست و محتوای پروتئین هر کلروپلاست کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که پروتئین نمی‌تواند به میزان کافی به‌عنوان کروموپروتئین فراهم شود که در نتیجه آن کلروز برگ‌ها اتفاق می‌افتد (۸).

در تحقیقی روی گیاهان مو و آفتابگردان که اثر غلظت بی‌کربنات در محلول غذایی و محلول خاک بر pH آپوپلاست و سیمپلاست بررسی شد، مشخص شد که غلظت‌های کل آهن سیمپلاست و آپوپلاست در برگ‌های کلروز شده گیاهان آفتابگردان (کشت شده در محلول غذایی) کاهش یافتند و در مو، توسعه برگ محدود شد (۲۸). علی‌رغم ممانعت شدید توسعه برگ مو در اثر بی‌کربنات، غلظت آهن کل در برگ‌های کلروز شده مشابه یا حتی بیشتر از برگ‌های سبز بود که بیانگر پارادوکس کلروزه شدن می‌باشد. رسوب آهن به‌صورت ترکیبات نامحلول در برگ‌های دچار کمبود آهن باعث این اتفاق می‌شود (۳۳). در آزمایشی که روی بادام زمینی (*Arachis hypogaea* L.) انجام گرفت، اضافه کردن بی‌کربنات، هم به خاک و هم به محلول غذایی، فعالیت آنزیم Fe^{+3} -ریداکتاز فعال را در ریشه‌ها کاهش داد. هم‌چنین مشخص شد که بی‌کربنات، مانع انتقال آهن از ریشه‌ها به شاخه‌ها شد (۲۳).

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر منابع مختلف آهن و غلظت‌های بی‌کربنات سدیم بر گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum L.*) رقم کالیفرنیا واندر، گیاهان در محیط کشت هیدروپونیک با چهار منبع تأمین آهن شامل سولفات آهن و سه نوع کود کی‌لیت آهن (Fe-EDTA، Fe-DTPA، Fe-EDDHA)، در گلخانه هیدروپونیک گروه باغبانی دانشگاه ولیعصر رفسنجان کاشته شدند. گیاهان در داخل سطل‌های پنج لیتری با هوادهی یکسان کشت شدند. ابتدا بذرها در اواخر اسفند سال ۱۳۸۹ در گلدان‌های حاوی بستر پرلایت کاشته شدند. سپس در مرحله ۴-۵ برگی به محیط حاوی محلول غذایی منتقل شدند. برای کشت از ۳۶ عدد سطل ۵ لیتری پس از ایجاد پنج سوراخ در درب آنها استفاده شد، که یک سوراخ جهت قرار دادن شیلنگ‌های متصل به پمپ دمنده هوا برای هوادهی و چهار سوراخ برای کشت گیاهان در نظر گرفته شد. برای تأمین اکسیژن مورد نیاز و هوادهی، از دو پمپ دو واتی بهره گرفته شد. آب مورد نیاز از یک دستگاه تصفیه آب با ۵ فیلتر موجود در گلخانه دانشکده تأمین شد و EC آب خروجی معادل ۱۴ میکروموس بر سانتی‌متر بود. عناصر پرمصرف مورد استفاده در محلول غذایی براساس محلول با غلظت یک چهارم هوگلند بود (۲۶). عناصر کم‌مصرف نیز (به غیر از آهن) براساس محلول هوگلند کامل فراهم شدند. محلول غذایی هر چهار روز یکبار تعویض می‌شد. بوته‌ها در ۱۵ مردادماه ۱۳۹۰ برداشت شدند.

عناصر غذایی که در این آزمایش اندازه‌گیری شدند شامل سدیم، آهن، منگنز، روی و مس در ریشه و شاخساره بودند. عناصر آهن، منگنز، روی و مس توسط دستگاه جذب اتمی (ساخت استرالیا ۱/۳۳ GBCAvanta, Version) و عنصر سدیم توسط شعله‌سنج (ساخت آلمان، مدل JENWAY, PFP7) اندازه‌گیری شدند. برای تهیه عصاره، ابتدا ۵/۰ گرم از نمونه خشک شده و آسیاب شده را وزن کرده و سپس در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت قرار داده شد تا نمونه‌ها 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 به‌طور مستقیم جهت اندازه‌گیری عناصر آهن، منگنز، روی، مس و سدیم به کار رفت.

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی، با دو فاکتور نوع کود آهن (سولفات آهن، Fe-EDTA، Fe-DTPA، Fe-EDDHA همگی در ۱۰ میکرومولار) و بی‌کربنات سدیم در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار) به‌ترتیب با pH های ۶/۹، ۸/۲ و ۸/۸ با سه تکرار اجرا شد (۱۳). تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطوح ۱ و ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱ و ۲) نشان داد که اثر بی‌کربنات و برهمکنش نوع کود آهن و بی‌کربنات بر غلظت آهن برگ در سطح ۱٪ معنی‌دار شد، ولی در ریشه فقط اثر بی‌کربنات در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. در پژوهش حاضر، با افزایش غلظت بی‌کربنات، به‌طورکلی غلظت آهن برگ در هر چهار تیمار کود آهن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. با توجه به نتایج جدول ۳، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در تمام تیمارها نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری در میزان آهن برگ رخ داد. همچنین، در تیمار ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم نیز کاهش معنی‌داری در غلظت آهن نسبت به تیمار ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم رخ داد که در مورد کود Fe-EDDHA این کاهش معنی‌دار نبود. عکس‌العمل‌های تغذیه‌ای گونه‌ها و ارقام گیاهی در پاسخ به تنش بی‌کربنات متفاوت است (۱۱). بی‌کربنات از طریق افزایش pH شیره سلولی در درون آوندها در نهایت سبب رسوب و غیرفعال شدن برخی از عناصر غذایی کم‌مصرف نظیر آهن و روی در گیاه می‌گردد و نیز اثر متقابل آن با سایر یونها باعث ایجاد اختلال در رشد و در نتیجه کاهش محصول می‌شود (۱). آهن یک

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس مربوط به میزان عناصر در برگ فلفل

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		پتاسیم	سدیم	آهن	منگنز
مس	روی	منگنز	آهن	سدیم	پتاسیم
کود آهن	۳	۰/۱۱۵۹ ^{ns}	۰/۰۲۰۳۵ ^{ns}	۴۶/۸۷۶ ^{ns}	۲۵۹۹/۵۴ ^{**}
بی کربنات سدیم	۲	۱/۸۰۳۷ ^{ns}	۰/۰۰۶۰۴۹ ^{ns}	۶۵۷۸/۶۵۳ ^{**}	۷۴۹۴/۴۲ ^{**}
کود×بی کربنات سدیم	۶	۰/۳۸۷۸ ^{ns}	۰/۰۴۷۱ ^{ns}	۱۹۲/۷۵۸ ^{**}	۴۰۲/۲۵ ^{**}
خطا	۲۲	۰/۶۲۴۹	۰/۰۳۴۴	۴۳/۰۴۲	۸۷/۵۵
CV	-	۲۳/۵۵	۴۹/۹۶	۹/۰۹	۱۳/۱۹

ns، *، ** به ترتیب معنی دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی دار

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس مربوط به میزان عناصر در ریشه فلفل

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		سدیم	آهن	منگنز	روی
مس	روی	منگنز	آهن	سدیم	پتاسیم
کود آهن	۳	۰/۰۸۸۶ ^{ns}	۶۶۷/۶۸۴ ^{ns}	۳۶۸/۱۷۴ ^{ns}	۱۲۷/۹۴۲ ^{ns}
بی کربنات سدیم	۲	۴/۵۹۴۷ ^{**}	۱۳۹۴۹/۴۴ [*]	۶۹۲۹۷/۲۹ ^{**}	۱۴۲۴/۶۱ ^{**}
کود×بی کربنات سدیم	۶	۰/۱۲۳۷ ^{**}	۴۴۶۴/۹۵ ^{ns}	۴۵۳۳/۰۳ ^{ns}	۵۰/۲۲۵ ^{ns}
خطا	۲۲	۰/۰۳۱۳	۳۸۷۶/۶۹	۳۷۵۹/۴۸	۵۷/۶۳
CV	-	۱۷/۶۸	۱۵/۸۴	۱۹/۳۰	۲۳/۷۸

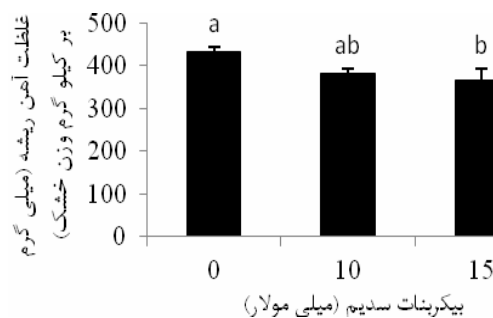
ns، *، ** به ترتیب معنی دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی دار

جدول ۳. برهمکنش غلظت‌های مختلف بی کربنات سدیم و نوع کود آهن بر غلظت آهن برگ (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در فلفل

نوع کود	شاهد	بی کربنات سدیم (۱۰ میلی مولار)	بی کربنات سدیم (۱۵ میلی مولار)
FeSO ₄	۹۴ ± ۳/۹۰a†	۷۲/۴۷ ± ۲/۱۴b	۵۸/۶۳ ± ۲/۵۴c
Fe-EDTA	۹۴/۱۶۷ ± ۸/۱۷a	۷۴/۰۰ ± ۲/۱۵b	۴۰/۳۰ ± ۲/۶۶d
Fe-DTPA	۱۰۲/۷۵ ± ۱/۰۶a	۷۳/۷۰ ± ۳/۳۵b	۴۰/۴۷ ± ۲/۹۷d
Fe-EDDHA	۹۳/۰۸ ± ۵/۱۸a	۶۴/۶۰ ± ۱/۰۳bc	۵۷/۴۰ ± ۱/۹۹c

†: مقادیر مثبت و منفی نشان‌دهنده خطای استاندارد (±SE) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در هر ستون و ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن می‌باشد.

عناصر ضروری جهت رشد گیاه است. اگرچه مقدار آهن کل اکثر خاک‌ها کافی می‌باشد، اما مقادیری که برای گیاه قابل دسترس است بسته به فاکتورهای متغیر خاک و ژنوتیپ‌های گیاهی ممکن است ناکافی باشد (۱۲). بی کربنات موجب کمبود آهن در کشت‌های خاکی و کشت بدون خاک می‌شود (۴ و ۳۳). افزایش غلظت یون بی کربنات حل‌پذیری آهن را



شکل ۱. اثر غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم بر میزان آهن در ریشه فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن می‌باشد.

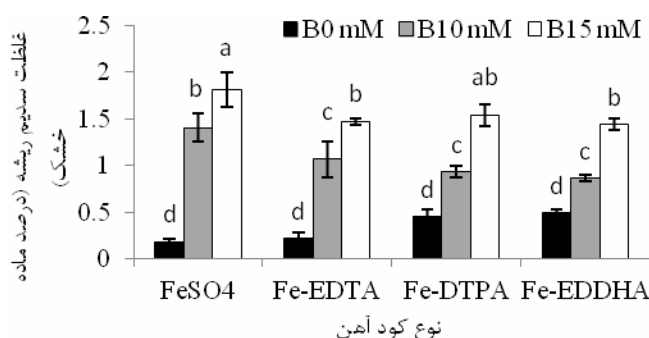
Fe-EDTA، کم‌محلول‌ترین کود آهن در pH زیاد می‌باشد (۳۸). البته قابلیت دسترسی آهن به‌صورت نمک $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ اساساً کم نیست. بلکه به‌دلیل تبدیل به منابع غیرقابل حل، قابلیت دسترسی آن کم می‌شود (۳۴).

در ریشه، غلظت آهن نسبت به برگ خیلی بیشتر بود (شکل ۱). افزایش غلظت آهن در ریشه نسبت به برگ ممکن است به‌علت تجمع این عنصر در آپوپلاست ریشه و عدم انتقال آن به اندام‌های هوایی باشد (۶). با توجه به شکل ۱، در ریشه نیز با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم غلظت آهن به‌طور معنی‌داری، به‌ویژه در تیمار ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، نسبت به شاهد کاهش یافت، که با نتایج دیگر محققین همخوانی دارد (۳۴).

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱ و ۲)، اثر بی‌کربنات و برهمکنش بی‌کربنات و نوع کود آهن بر سدیم ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. در این تحقیق، با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، میزان سدیم در ریشه افزایش پیدا کرد که ممکن است باعث کاهش غلظت پتاسیم در ریشه‌ها بشود (۱۶). البته براساس شکل ۲، در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، بیشترین غلظت سدیم ریشه مربوط به تیمار سولفات آهن بود. دلیل این امر می‌تواند به جهت از دسترس خارج شدن آهن و کاهش رشد قسمت هوایی و در نتیجه عدم انتقال سدیم به قسمت هوایی در این تیمار باشد که باعث افزایش غلظت سدیم در ریشه شده است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱ و ۲) نشان داد که

کاهش می‌دهد و از جذب آهن توسط ریشه‌ها و انتقال آن به شاخه‌ها و برگ‌ها ممانعت می‌کند (۲۷). نکته قابل توجهی که در جدول ۳ وجود دارد این است که میزان آهن برگ در تیمار سولفات آهن در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم تفاوت معنی‌داری با دیگر منابع کود آهن نداشت و در غلظت ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم نسبت به تیمار Fe-EDTA و Fe-DTPA حتی بیشتر هم بود و با تیمار Fe-EDDHA تفاوت معنی‌داری نداشت. البته در تیمار سولفات آهن، گیاهان هم در غلظت ۱۰ میلی‌مولار و هم در غلظت ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کلروز شدید را نشان دادند. این موضوع بیان‌کننده رسوب آهن در داخل گیاه است و این پدیده به عارضه پارادوکس کلروزه شدن معروف می‌باشد. این پدیده احتمالاً با تجمع آهن در سیستم آوندی یا بافت‌های آن در ارتباط است (۱۷ و ۳۵). همان‌طور که ذکر شد در غلظت زیاد بی‌کربنات، تیمار Fe-EDDHA نسبت به بقیه کی‌لیت‌ها (Fe-EDTA و Fe-DTPA) میزان آهن بیشتری داشت. دلایل زیادتر بودن غلظت آهن در تیمار Fe-EDDHA در تحقیقات مختلف بیان شده است (۲۱). در واقع نتایج تحقیقات نشان داده که Fe-EDDHA یک کود مؤثر جهت خاک‌های آهکی است و یک کی‌لیت پایدار در محدوده pH ۹-۴ است (۱۵). پایداری Fe-EDDHA^۴ تا ۱۰^۶ مرتبه بیشتر از دیگر کی‌لیت‌های قابل دسترس از قبیل Fe-EDTA و Fe-DTPA است (۱۹). کود سولفات آهن در مقایسه با کودهای Fe-EDDHA و



شکل ۲. برهمکنش غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم و نوع کود بر غلظت سدیم در ریشه. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است. B0 = بی‌کربنات صفر میلی‌مولار، B10 = بی‌کربنات ۱۰ میلی‌مولار و B15 = بی‌کربنات ۱۵ میلی‌مولار

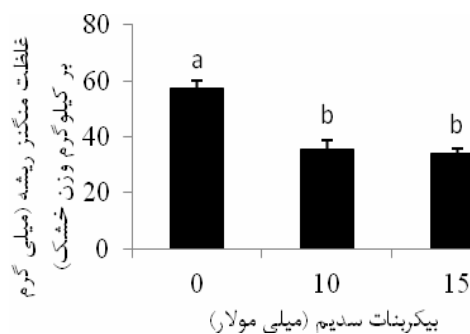
جدول ۴. برهمکنش غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم و نوع کود آهن بر غلظت منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در برگ فلفل

نوع کود	شاهد (صفر میلی‌مولار)	بی‌کربنات سدیم (۱۰ میلی‌مولار)	بی‌کربنات سدیم (۱۵ میلی‌مولار)
FeSO ₄	۱۰۲/۸۰ ± ۳/۴۶a†	۹۶/۴۳ ± ۴/۸۲a	۸۵/۲۷ ± ۳/۵۸a
Fe-EDTA	۹۴/۳۳ ± ۵/۲۳a	۵۷/۴۷ ± ۹/۱۷bc	۳۴/۳۳ ± ۳/۱۷d
Fe-DTPA	۱۰۰/۲۰ ± ۴/۰۷a	۶۷/۱۷ ± ۴/۹۵b	۴۴/۰۷ ± ۳/۴۶cd
Fe-EDDHA	۹۳/۵۰ ± ۴/۳۱a	۴۵/۸۷ ± ۵/۵۸cd	۲۹/۳۳ ± ۷/۴۴d

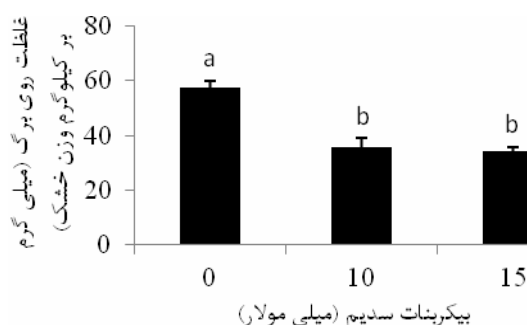
†: مقادیر مثبت و منفی نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در هر ستون و ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.

هر سه تیمار کی‌لیت آهن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۴). در ریشه نیز نتایج به این صورت بود که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری در غلظت منگنز ریشه نسبت به شاهد رخ داد و بین غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۳). غلظت‌های زیاد یک یون فلزی می‌تواند مانع از جذب یون‌های دیگر با توجه به ممانعت‌هایی که توسط جفت‌های Ca-Fe, Ca-Mn, Ca-Zn, Cu-Zn, Cu-Mn, Fe-Mn و Mg-Zn ثبت شده، بشود (۲۵). البته هم در غلظت ۱۰ میلی‌مولار و هم در غلظت ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، بیشترین غلظت منگنز برگ مربوط به تیمار سولفات آهن بود. در واقع، در تیمار سولفات آهن، با افزایش غلظت بی‌کربنات،

اثر بی‌کربنات، نوع کود آهن و برهمکنش بی‌کربنات و نوع کود آهن بر منگنز برگ در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. ولی در ریشه فقط اثر بی‌کربنات در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. منگنز یکی از عناصر کم‌مصرف ضروری برای رشد و نمو طبیعی گیاه است و هم‌چنین به‌عنوان یک فعال‌کننده جهت آنزیم‌های درگیر در چرخه تری‌کربوکسیلیک اسید نقش دارد (۶). منگنز بخشی از ساختار آنتی‌اکسیدان سوپر اکسید دیسموتاز است که با غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد، که مخرب بافت سلول هستند، سلول‌های گیاه را محافظت می‌کند. نقش منگنز در فتوسنتز مهم بوده و به‌عنوان یک ترکیب ساختاری پروتئین تجزیه‌کننده آب در فتوسیستم II است (۱۴). نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت بی‌کربنات، به‌طور کلی غلظت منگنز در برگ در



شکل ۳. اثر غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم بر میزان منگنز در ریشه فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.



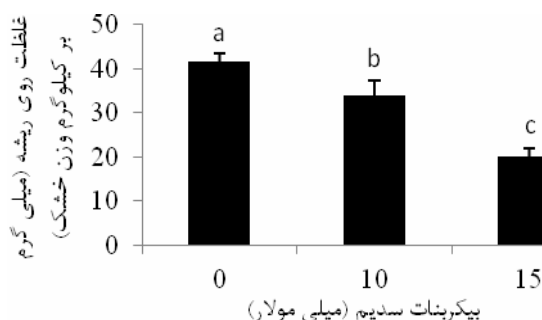
شکل ۴. اثر غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم بر میزان روی در برگ فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.

به‌عنوان پیش‌نیاز ساخت هورمون اکسین است که در رشد طولی شاخه‌ها مؤثر می‌باشد (۲۵). در پژوهش حاضر، با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، غلظت روی در برگ و ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که افزایش pH محلول در اثر بی‌کربنات در آن مؤثر بوده است. زیرا pH محلول غذایی در سه سطح صفر، ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات به‌ترتیب ۶/۹، ۸/۲ و ۸/۸ بود. کاهش قابلیت دسترسی روی در شرایط قلیایی و با افزایش pH قبلاً گزارش شده است (۱۸). بیشترین غلظت روی در برگ با توجه به شکل ۶ مربوط به تیمار سولفات آهن بود که می‌تواند به‌دلیل کاهش جذب آهن و در نتیجه کاهش رقابت آهن و روی باشد. البته به رابطه آنتاگونیستی بین آهن و روی در تحقیقات مختلف اشاره شده است (۹).

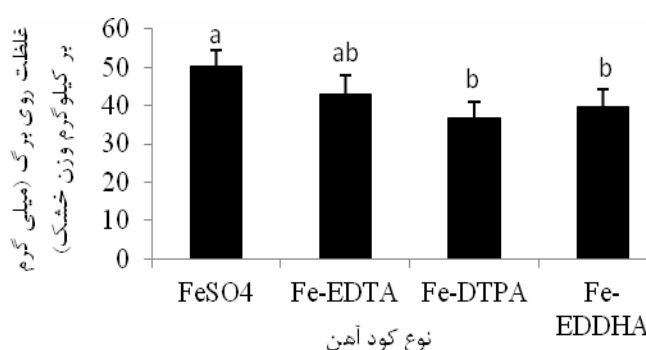
نتایج مربوط به تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱ و ۲) نشان

کاهش معنی‌داری در غلظت منگنز رخ نداد، که دلیل این امر می‌تواند به‌خاطر کاهش جذب آهن و در نتیجه کاهش رقابت آهن و منگنز باشد. همچنین، همراه با افزایش میزان زردی برگ بر اثر افزایش بی‌کربنات، افزایش مقدار منگنز نیز گزارش شده است (۴).

نتایج مربوط به تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱ و ۲) نشان داد که اثر بی‌کربنات و نوع کود آهن بر غلظت روی در برگ در سطح ۱٪ معنی‌دار شد؛ ولی در ریشه، فقط اثر بی‌کربنات در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. روی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی گیاه نقش کاتالیزوری، فعال‌کننده و یا ساختمانی دارد و در ساخته شدن و تجزیه پروتئین‌ها در گیاه نیز دخیل است. تنظیم آب و همچنین تولید انرژی در گیاه نیز با دخالت روی صورت می‌پذیرد. روی در ترکیب حدود ۶۰ آنزیم گیاهی نقش دارد و یکی از بارزترین نقش‌های روی در ساخت اسید آمینه تربیتوفان



شکل ۵. اثر غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم بر میزان ریشه فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.



شکل ۶. اثر نوع کود آهن بر میزان ریشه برگ فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.

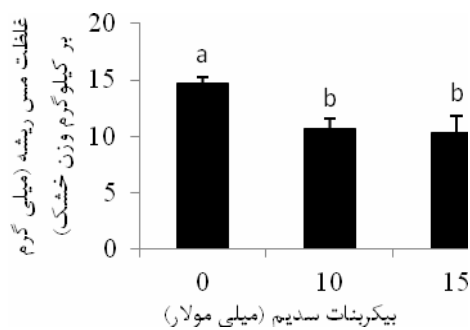
جدول ۵. برهمکنش غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم و نوع کود آهن بر غلظت مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در برگ فلفل

نوع کود	شاهد (صفر میلی‌مولار)	بی‌کربنات سدیم (۱۰ میلی‌مولار)	بی‌کربنات سدیم (۱۵ میلی‌مولار)
FeSO ₄	۹/۱۷ ± ۰/۸۵a†	۳/۵۷ ± ۰/۳۲cd	۵/۸۷ ± ۰/۴۷b
Fe-EDTA	۸/۹۰ ± ۰/۹۸a	۵/۲۵ ± ۰/۷۲bc	۲/۵۷ ± ۰/۳۰d
Fe-DTPA	۷/۸۳ ± ۱/۰۹a	۲/۹۰ ± ۰/۲۱d	۳/۰۰ ± ۰/۴۰cd
Fe-EDDHA	۸/۰۸ ± ۰/۷۶a	۳/۱۳ ± ۰/۳۰d	۲/۶۳ ± ۰/۲۰d

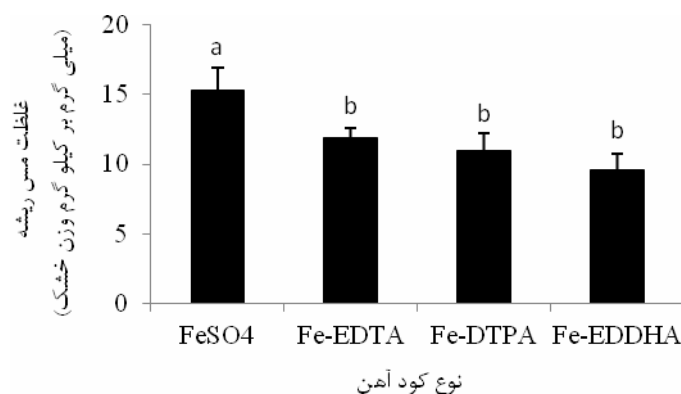
†: مقادیر مثبت و منفی نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در هر ستون و ردیف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است.

بی‌کربنات، غلظت مس برگ نیز کاهش یافت (جدول ۵)، که با گزارش‌های قبلی مطابقت دارد (۲۹). در ریشه نیز با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، غلظت مس کاهش یافت (شکل ۷). هم‌چنین، بیشترین غلظت مس ریشه مربوط به تیمار سولفات

داد که اثر بی‌کربنات و نوع کود آهن بر غلظت مس برگ و ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. ولی برهمکنش بی‌کربنات و نوع کود آهن فقط در برگ در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. در پژوهش حاضر، در هر چهار تیمار کودی، با افزایش غلظت



شکل ۷. اثر غلظت‌های مختلف بی‌کربنات سدیم بر میزان مس در ریشه فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.



شکل ۸. اثر نوع کود آهن بر میزان مس در ریشه فلفل. شاخص بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm SE$) می‌باشد. حروف لاتین متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.

هم‌چنین به‌وجود آمدن ترکیبات غیرمحلول مس در خاک مثل فسفات، کربنات و سولفید مس نیز از مس قابل جذب گیاه می‌کاهد (۲۵).

نتیجه‌گیری

بر خلاف کاهش رشد و کلروز شدیدی که گیاهان در تیمار سولفات آهن نشان دادند، غلظت آهن در این تیمار در غلظت‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در مقایسه با تیمارهای کی‌لیت آهن تفاوت معنی‌داری نداشت و حتی در مواردی بیشتر هم بود که بیانگر عارضه پارادوکس کلروزه شدن می‌باشد. این عارضه به‌دلیل رسوب آهن در درون گیاه و بی‌استفاده ماندن آن و در نتیجه ایجاد زردی ناشی از کمبود آهن

آهن بود که می‌تواند به‌دلیل رسوب آهن و کاهش رشد در این تیمار و در نتیجه افزایش غلظت مس باشد (شکل ۸). البته با توجه به جدول ۵، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، بیشترین غلظت مس برگ مربوط به تیمار Fe-EDTA بود که دلیل این امر می‌تواند جایگزینی Cu با Fe در کی‌لیت EDTA باشد (۳۹). زیرا کی‌لیت‌های مس در قیاس با همه عناصر غذایی دیگر پایدارترند. مس در شماری از فرایندهای فیزیولوژیک از قبیل فتوسنتز و چرخه انتقال الکترون تنفسی نقش دارد. هم‌چنین، به‌عنوان یک کوفاکتور یا به‌عنوان یک قسمتی از گروه پروستتیک تعداد زیادی از آنزیم‌های کلیدی در مسیرهای متابولیک مختلف، از جمله سنتز ATP، نقش دارد (۳). با بالا رفتن pH، مقدار مس قابل جذب در خاک کم می‌شود و

فعال در گیاه اتفاق می‌افتد. در حضور بی‌کربنات و در تیمار سولفات آهن، غلظت عناصر منگنز، روی و مس گیاه بیشتر از کی‌لیت‌ها بود که احتمالاً به علت کاهش رقابت آهن در این تیمار با این عناصر بوده است. بنابراین، اگرچه استفاده از کی‌لیت‌های آهن و به‌ویژه Fe-EDDHA برای تأمین آهن در شرایط قلیایی توصیه می‌شود، ولی غلظت‌های زیاد آن ممکن است باعث کمبود عناصر منگنز، روی و مس در گیاه شود.

منابع مورد استفاده

۱. ملکوتی، م. ج. ع. ا. شهابی. ۱۳۸۲. نقش بی‌کربنات در بروز ناهنجاری‌های تغذیه‌ای درختان میوه. انتشارات سنا، ۱۰۸ صفحه.
۲. ملکوتی، م. ج. ع. م. ا. حیایی و ژ. خوش‌خبر. ۱۳۷۸. بیکربنات آب‌های آبیاری مانعی در راه افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در کشور. نشریه فنی شماره ۶۷، وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تات، نشر آموزش کشاورزی، کرج.
3. Alaoui-Sosse, B., P. Genet, F. Vinit-Dunand, M. L. Taussaint, D. Epron and P. M. Badot. 2004. Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Sci.* 166: 1213-1218.
4. Alhendawi, R. A., V. Romheld, E. A. Kirkby and H. Marschner. 1997. Influence of increasing bicarbonate concentrations on plant growth, organic acid accumulation in roots and iron uptake by barley, sorghum and maize. *J. Plant Nutr.* 20: 1731-1753.
5. 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. *Plant Soil* 262: 5-15.
6. Arya, S. K. and B. K. Roy. 2011. Manganese induced changes in growth, chlorophyll content and antioxidants activity in seedlings of broad bean (*Vicia faba* L.). *J. Environ. Biol.* 32(6): 707-711.
7. Bailey, D. A. 1996. Alkalinity, pH and acidification. PP. 69-91. *In: Reed, D. W. (Ed.), Water, Media and Nutrition*, Ball Publ., Batavia, IL.
8. Barker, A. V. and D. J. Pilbeam. 2007. *Handbook of Plant Nutrition*. CRT/Taylor and Francis, 613 p.
9. Basar, H. and A. Ozgumus. 1999. Effect of various iron fertilizers and rates on some micro nutrient concentrations of peach trees. *J. Agric. Forest.* 23: 273-281.
10. Campbell, S. A. and J. N. Nishio. 2000. Iron deficiency studies of sugar beet using an improved sodium bicarbonate- buffered hydroponic growth system. *J. Plant Nutr.* 23: 741-757.
11. Cartmill, A. D. 2004. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance to bicarbonate in *Rosa multiflora* cv. Burr. MSc. Thesis, Texas A & M Univ., 72 p.
12. Celik, H. and A. V. Katkat. 2008. Effect of bicarbonate and iron-deprivation on growth of different maize varieties. *Amer.-Euras. J. Agric. Environ. Sci.* 3(2): 169-178.
13. Csog, A., V. G. Mihucz, E. Tatar, F. Fodor, I. Virag, C. Majdik and G. Zaray. 2011. Accumulation and distribution of iron, cadmium, lead and nickel in cucumber plants grown in hydroponics containing two different chelated iron supplies. *J. Plant Physiol.* 168: 1038-1044.
14. Diedrick, K. 2010. Manganese fertility in soybean production. *Agron. Sci.* 20(14): 15-20.
15. Hashemimajd, K. and A. Golchin. 2009. The Effect of iron-enriched vermicompost on growth and nutrition of tomato. *J. Agric. Sci.* 11: 613-621.
16. Husain, S., S. V. Caemmerer, and R. Munns. 2004. Control of salt transport from roots to shoots of wheat in saline soil. *Funct. Plant Biol.* 31: 1115-1126.
17. Jimenez, S., F. Morales, J. Abadia, A. Abadia, M. A. Moreno and Y. Gogorcena. 2009. Elemental 2-D mapping and changes in leaf iron and chlorophyll in response to iron re-supply in iron deficient GF 677 peach-almond hybrid. *Plant Soil* 315: 93-106.
18. Kopittk, P. M. and N. W. Menzies. 2004. Control of nutrient solutions for studies at high pH. *Plant Soil* 266: 343-354.
19. Kroll, H. 1957. The ferric chelate of ethylenediamine di (o-hydroxyphenylacetic acid) for treatment of lime-induced chlorosis. *Soil Sci.* 84: 51-53.
20. Ksouri, R., A. Debez, H. Mahmoudi, Z. Ouerghi, M. Gharsalli and M. Lachaal. 2007. Genotypic variability within Tunisian grapevine varieties (*Vitis vinifera* L.) Facing bicarbonate-induced iron deficiency. *Plant Physiol. Biochem.* 45: 315-322.
21. Lindsay, W. L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. The Blackburn Press, Caldwell, NJ.

22. Lindsay, W. L., J. F. Hodgson and W. A. Norvell. 1967. The physicochemical equilibrium of metal chelates in soils and their influence on the availability of metal cations. Intl. Soil Sci. Congr. pp. 305-316.
23. Li-Xuan, R., Z. Yuan-Mei, J. Rong-Feng and Z. Fu-Suo. 2005. Mechanisms of bicarbonate induced iron- deficiency chlorosis of peanut on calcareous soils. Acta Ecol. Sinica 4: 795-801.
24. Mahmoudi, H., H. W. Koyro, A. Debez and C. Abdelly. 2009. Comparison of two chickpea varieties regarding their responses to direct and induced Fe deficiency. Environ. Exp. Bot. 66: 349-356.
25. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Ed., Academic Press, New York.
26. Mohsenian, Y., H. R. Roosta, H. R. Karimi and M. Esmailizadeh. 2012. Investigation of the ameliorating effects of eggplant, datura, orange nightshade, local Iranian tobacco, and field tomato as rootstocks on alkali stress in tomato plants. Photosynthetica 50(3): 411-421.
27. Nikolic, M. and R. Kastori. 2000. Effect of bicarbonate and Fe supply on Fe nutrition of grapevine. J. Plant Nutr. 23(11-12): 1619-1627.
28. Nikolic, M. and V. Romheld. 2002. Dose high bicarbonate supply to roots change availability of iron in the leaf apoplast. Plant Soil 241: 67-74.
29. Parker, M. B. and M. E. Walker. 1986. Soil pH and manganese effects on manganese nutrition of peanut. J. Agron. 78: 614-620.
30. Pearce, R. C., Y. Li and L. P. Bush. 1999. Calcium and bicarbonate effects on the growth and nutrient uptake of burley tobacco seedlings: Hydroponic culture. J. Plant Nutr. 22 (7): 1069-1078.
31. Petersen, F. H. 1996. Water testing and interpretation. PP. 31-49. In: Reed, D. W. (Ed.), Water, Media and Nutrition, Ball Publ., Batavia, IL.
32. Rivero, R. C., Z. R. Rodriguez and C. D. Romero. 2003. Effects of current storage conditions on nutrient retention in several varieties of potatoes from Tenerife. Food Chem. 80: 445-450.
33. Romheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. J. Plant Nutr. 23: 1629-1643.
34. Savitha, H. R. 2008. Effect of iron-EDTA on yield and quality of red chilli (*Capsicum annum* L.) in a calcareous vertisol of zone-8 of Karnataka. MSc. Thesis, Dharwad Univ. of Agric. Sci., Dharwad, India.
35. Tomasi, N., C. Rizzardo, R. Monte, S. Gottardi, N. Jelali, R. Terzano, B. Vekemans, D. De Nobili, Z. Varanini, R. Pinton and S. Cesco. 2009. Micro-analytical, physiological and molecular aspects of Fe acquisition in leaves of Fe-deficient tomato plants re-supplied with natural Fe complexes in nutrient solution. Plant Soil 325: 25-38.
36. 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 recirculating hydroponic. J. Plant Nutr. 31: 2018-2030.
37. Valdez-Aguilar, L. A., C. M. Grieve and J. Poss. 2009. Salinity and alkaline pH in irrigation water affect marigold plants: I. Growth and shoot dry weight partitioning. Hortsci. 44: 1719-1725.
38. Wik, R. M., P. R. Fisher and D. A. Kopsell. 2006. Iron form and concentration affect nutrition of container- grown pelargonium and calibrachoa. Hort. Sci. 41(1): 244-251.
39. Yunta, F., S. Garcia-Marco and J. J. Lucena. 2003. Theoretical speciation of ethylenediamine-N-(o-hydroxyphenylacetic)-N-(p-hydroxyphenylacetic) acid (o,p-EDDHA) in agronomic conditions. J. Agric. Food Chem. 51: 5391-5399.

Interactive effect of sodium bicarbonate and different Fe sources on micronutrients concentration in bell pepper plants

M. Pourebrahimi¹, H. R. Roosta^{1*} and M. Hamidpour²

(Received: 07 Aug-2012 ; Accepted: 24 July-2013)

Abstract

In order to investigate the effect of different Fe sources on micronutrients concentration, especially Fe, in bell pepper (*Capsicum annuum* L. cv. California Wonder), under alkaline conditions and hydroponic system, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with two factors of sodium bicarbonate (NaHCO₃) at three levels (0, 10 and 15 mM) and four forms of Fe fertilizer (FeSO₄, Fe-EDTA, Fe-DTPA and Fe-EDDHA) all at 10 mM and three replications. According to the obtained results, NaHCO₃ stress caused a reduction in P, Fe, Mn, Zn, Cu and K, and an enhancement in Na concentration. When the FeSO₄ source was used, an increase in NaHCO₃ concentration resulted in severe chlorosis of the plants, although Fe concentration in this treatment not only was not lower than Fe chelate- treated plants, but also it was higher in some cases. In the presence of NaHCO₃ and FeSO₄ treatment, the concentration of Mn, Zn and Cu in plants was higher than in plants treated with Fe-chelates, which might be due to the reduction of Fe competition with these elements in this treatment. Therefore, although the use of Fe chelates, especially Fe-EDDHA, for Fe provision in alkaline condition is recommended, but its high concentrations may cause Mn, Zn and Cu deficiency in plants.

Keywords: FeSO₄, Alkalinity, Fe chelate, Hydroponics.

1. Dept. of Hort. Sci., Vali-e-Asr Univ. of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2. Dept. of Soil Sci., Vali-e-Asr Univ. of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: roosta_h@yahoo.com