

مقایسه اثر نانوکلات آهن با کلات آهن بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیک دو رقم فلفل دلمه‌ای در شرایط قلیائی در سیستم کشت بدون خاک

حمیدرضا روستا^{۱*}، داراب رضاخانی نژاد^۱، محمود رقامی^۱ و مجید اسماعیلی‌زاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸)

چکیده

به منظور تعیین بهترین منابع آهن برای گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum*, L.) در شرایط قلیائی و غیر قلیائی، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور نوع کود آهن در سه سطح (شاهد (بدون آهن)، نانوکلات آهن و Fe-EDDHA)، بی‌کربنات سدیم در دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌مolar) و رقم در دو سطح (بنanza و گریفاتون) در سه تکرار در گلخانه‌ای دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان اجرا شد. گیاهان پس از ۴۵ روز رشد در محیط کشت بدون خاک، به مدت دو ماه تحت تیمار بی‌کربنات سدیم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش ویژگی‌های رویشی (وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه)، زیستی (تعداد میوه، طول میوه، وزن میوه، قطر میوه) و اکوفیزیولوژیک (RWC و PI, F_v/F_m) مربوط به تیمار شاهد بود. در رابطه با رنگیزه‌های گیاهی، با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، کمترین میزان کلروفیل a, b و کارتونیویدها مربوط به تیمار شاهد و بیشترین مقدار مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود. تنش بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی دار غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه گردید. بر اساس نتایج حاصل، و با توجه به ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده، در غلظت ۱۰ میلی‌مolar بی‌کربنات سدیم، بهترین منبع کودی، کلات آهن Fe-EDDHA بود و کود نانوکلات آهن بعد از کلات آهن Fe-EDDHA قرار گرفت.

کلمات کلیدی: قلیائیت، نانوکلات آهن، عناصر غذایی، آبکشت

مقدمه

اما کم مصرف و کم تحرک برای گیاهان است. گیاهان در بین همه‌ی عناصر کم مصرف، بیشترین نیاز را به آهن دارند. آهن، بخشی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا است و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز می‌باشد (۳). قلیائیت و pH دو جنبه‌ی متفاوت کیفیت آب هستند. اصطلاح pH معیاری از تعادل بین یون‌های هیدروژن

امروزه، در جهان، بیش از نیمی از محصولات گلخانه‌ای به روش آبکشت تولید می‌شوند (۴۹). سیستم کشت گلخانه‌ای بدون خاک یا هیدروپونیک، امکان کنترل هر چه بهتر تغذیه گیاهان را فراهم آورده و تحول شکری در عرضه محصولات گلخانه‌ای ایجاد کرده است (۴۹). آهن یکی از عناصر ضروری

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

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

غلهٔ EDDA به‌واسطهٔ بی‌کربنات به‌طور ویژه‌ای در عرض ۷ روز به‌سرعت کاهش یافت. همچنین، مشخص شد که غلهٔ DTPA و EDTA با توجه به حجم، در سرتاسر آزمایش‌ها ثابت باقی ماند و بنابراین کاهش کلات‌ها ممکن است به خاطر جذب گیاه یا تجزیه نوری کلات اتفاق افتد. روستا و محسینیان (۳۲) نشان دادند که محلول پاشی منابع مختلف آهن (Fe-EDDHA، FeSO₄ و Fe-DTPA) روی گیاه فلفل سبب افزایش رشد رویشی، عملکرد و رنگ‌گیری بهتر می‌وهم در سیستم آکپونیک و هیدروپونیک گردید و همچنین باعث افزایش مقدار کلروفیل^a، کلروفیل کل، کاروتینوئیدها و قندهای محلول شد. اثر محلول پاشی کودهای کلات آهن بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک چهار رقم پسته ایران بررسی شد و مشخص گردید که محلول پاشی کلات آهن نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش میزان فتوسترنز، هدایت روزنی‌ای، تعرق و کارایی مصرف آب و کاهش میزان مقاومت روزنی‌ای شد (۴). در آزمایشی به‌منظور تعیین بهترین منبع آهن تحت شرایط قلیایی از چهار منبع کودی، FeSO₄ و Fe-EDDHA استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش رشد رویشی (طول ساقه، تعداد برگ، سطح برگ و وزن خشک ریشه) و ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک (F_v/F_m) و SPAD (RWC) در گیاهان تیمار شده با FeSO₄ مشاهده شد. کودهای آهن EDTA و DTPA در حضور ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، مشابه و یا حتی بهتر از EDDHA بودند. اما در غلهٔ ۱۵ مولار NaHCO₃ بهترین منبع کود آهن EDDHA بود (۳۴). به دلیل اثرهای مضری که کودهای شیمیایی مرسوم بر محیط‌زیست ایجاد می‌کنند، مدت‌هاست که استفاده از آن‌ها مورد سؤال قرار گرفته است (۷). با به کارگیری نانوکودها (Nano fertilizers) به عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به تدریج و به صورت کنترل شده در خاک آزاد می‌شوند. استفاده از نانوکودها منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن آثار منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد

(H⁺) اسیدی و یون‌های هیدروکسید (OH⁻) بازی است. هنگامی که pH بیش از ۷ است، غلهٔ OH⁻ بیشتر از H⁺ است و محلول بازی یا قلیایی خوانده می‌شود که با قلیائیت نباید اشتباه گرفته شود. قلیائیت معیاری از میزان افزودن اسید است که با کمتر شدن pH از یک حد مشخص به دست می‌آید (۱۱). قلیائیت ناشی از بی‌کربنات باعث ایجاد تنفس در گیاهان می‌شود. گیاهان به غلهٔ زیاد بی‌کربنات از طریق کاهش رشد شاخصاره واکنش نشان می‌دهند و این ممانعت در رشد شاخصاره در برگ‌های کاهش در تعداد برگ‌ها، وزن تر و خشک گیاه و طول ساقه خواهد بود. مطالعات مختلف نشان داده که رشد لوبیا سبز (۴۵)، نخودفرنگی (۵۱) و ذرت (۱۵) در محیط‌هایی که غلهٔ زیاد از بی‌کربنات دارند، کاهش می‌یابد. در آزمایشی، سرعت فتوسترنز خالص، هدایت روزنی‌ای، غلهٔ CO₂ درون‌سلولی، حداکثر بهره‌وری از فتوسیستم دو (PSII) و میزان حداکثر عملکرد کواتسوی فتوشیمیایی (F_v/F_m)، شاخص کارایی فتوسترنزی (PI)، محتوای کلروفیل برگ، وزن تر و ارتفاع گیاه در دانه‌های ذرت با افزایش شوری و قلیائیت کاهش یافت (۱۵). به علت غیر متحرک بودن آهن در گیاه، فراهم کردن دائم آهن از یک منبع کودی جهت تولید کلروفیل در نقاط در حال رشد، لازم است (۲۷). بدیهی است که افزودن آهن در شکل‌های غیر کلات به خاک‌ها، مخصوصاً در خاک‌های آهکی ایران، تأثیر زیادی در فراهم آوردن آهن برای گیاه و میکرووارگانیسم‌های خاک ندارد. چرا که آهن آزاد به سرعت هیدراته شده و به صورت هیدروکسیدهای آهن رسوب می‌کند و قابل استفاده نیست (۱۳). در پژوهش‌های انجام گرفته برای تعیین بهترین منبع آهن جهت جلوگیری از کلروز آهن در گیاهان، نتایج متناقضی به دست آمده است. در آزمایشی، وادس و همکاران (۴۳) به EDDA و EDTA و DTPA اثر غلهٔ گلخانه‌ای (Ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid) گیاه کاهو در محیط هیدروپونیک پرداختند و ماندگاری (ثبات) این سه نوع کلات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که

اساس محلول یک‌دوم غلظت هوگلند (۱۸) و عناصر ریزمغذی بر اساس محلول هوگلند کامل مورد استفاده قرار گرفت. این محلول غذایی حاوی ۰/۵ میلی‌مولار KH_2PO_4 , ۲/۵ میلی‌مولار KNO_3 , ۱ میلی‌مولار $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ۰/۵ میلی‌مولار $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ در لیتر H_3BO_3 ۱/۸۱ میلی‌گرم در لیتر $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ در لیتر $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ۰/۲۲ میلی‌گرم در لیتر $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ۰/۰۲ میلی‌گرم در لیتر $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ بود. جهت تأمین آهن از دو منبع متفاوت آهن (به میزان ۰/۵ mg Fe/L) شامل کلات آهن (Fe-EDDHA) و نانوکلات آهن خضرا استفاده شد. کلات آهن (Fe-EDDHA) و نانوکود خضرا به ترتیب حاوی ۶ و ۹ درصد آهن بودند. بعد از گذشت ۳ هفته، تیمارهای بی‌کربنات در دو سطح مختلف صفر و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم) به مدت ۶۰ روز اعمال گردیدند. pH محلول زهکش در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم به ترتیب ۶/۷۵ و ۷/۸۵ بود.

ویژگی‌های رویشی و زایشی

در پایان آزمایش، برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک، ابتدا هر گیاه از گلدان بیرون آورده شد و به دو قسمت اندام هوایی و ریشه تقسیم شد و پس از شستشوی سیستم ریشه‌ای، وزن تر اندام هوایی و ریشه مشخص شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس توزین شدند. میوه‌های بالغ فلفل در طول آزمایش برداشت و وزن تر آن‌ها با استفاده از ترازوی با دقیق ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. طول و قطر میوه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های فتوستزی

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل از دستگاه Chlorophyll Pocket Fluorimeter (مدل PEA) کمپانی Hansatech ساخت کشور انگلستان) استفاده گردید. این دستگاه، میزان فلورسانس کلروفیل را بر اساس ویژگی F_v/F_m ثبت می‌کند. روش کار

کود می‌شود (۷). ترکیبات کلاته آهن بهترین راه حل برای برطرف کردن کلروز آهن در همه خاک‌ها و به خصوص خاک‌های قلیایی بوده و می‌توانند شدیدترین مشکلات تغذیه‌ای گیاهان را علاج نمایند (۱). نانوکود کلات آهن دارای کمپلکس منحصر به‌فردی است و این نانوکمپلکس دارای ۹٪ آهن محلول در آب در بازه $pH > ۱۱$ است (۱).

بنابراین، با توجه به نتایج گزارش شده مبنی بر عملکرد خوب نانوکودها در بستر خاکی و در دسترس نبودن اطلاعات کافی در مورد اثر این کودها در سیستم‌های بدون خاک، این پژوهش با هدف مقایسه اثر منابع مختلف آهن، به‌ویژه نانوکلات آهن، بر ویژگی‌های رشد و نمو فلفل، در شرایط قلیائی، در سیستم کشت بدون خاک صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

کاشت بذرها و محلول‌دهی

این پژوهش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور نوع کود آهن در سه سطح (شاهد بدون آهن، نانوکلات آهن و Fe-EDDHA)، بی‌کربنات سدیم در دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌مولار) و رقم (بانanza و گریفاتون) در سه تکرار در گلخانه‌ی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (ع) رفسنجان روی گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum L.*) اجرا شد. ابتدا بذرها در اواسط اسفندماه ۱۳۹۲ در بستر کشت بدون خاک با محیط کشت پرلیت کشت شدند و بعد از مرحله ۴ برگی به گلدان‌های یونولیتی منتقل شدند. همه‌ی گلدان‌ها با کوکوپیت و پرلیت با نسبت ۷۰ به ۳۰ پر شده بودند. گیاهان بعد از انتقال به بسترها کشت، روزانه دو بار و هر بار به مقدار ۲۰۰ میلی‌لیتر با محلول غذایی آبیاری شدند. آب مورد نیاز از یک دستگاه تصفیه‌ی آب با ۵ فیلتر و EC آب خروجی معادل ۱۴ میکرومیکرگرام بر سانتی‌متر، موجود در گلخانه دانشکده تأمین شد. در طول مدت اعمال تیمارها شرایط دمایی گلخانه ۲۴ ± ۳ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی $۵۲/۴ - ۶۳/۲$ درصد ثبت گردید. عناصر پرمصرف مورد استفاده در محلول غذایی بر

شده و آسیاب شده، توزین و در کوره با دمای ۵۵°C درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت قرار داده شد تا تبدیل به خاکستر شد. سپس، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریداریک ۲ نرمال، به هر نمونه اضافه گردید و در نهایت توسط آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. این عصاره به طور مستقیم جهت اندازه‌گیری عناصر پتاسیم، کلسیم، آهن، روی، منگنز و مس به کار رفت. عناصر آهن، روی، مس و منگنز بعد از عصاره‌گیری با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل GBC avanta ساخت کشور استرالیا)، پتاسیم با استفاده از دستگاه فیلم فتوومتر، فسفر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر، نیتروژن توسط دستگاه کجلداو و کلسیم از طریق تیتراسیون اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ محاسبه گردید.

نتایج و بحث ویژگی‌های رویشی

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) تأثیر رقم، بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی فلفل در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که صرف نظر از نوع منبع آهن به کار رفته، افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم به طور معنی‌داری باعث کاهش وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه گیاه فلفل شد (جدول‌های ۲ و ۳). در هر دو سطوح صفر و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، بیشترین وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود. مطابق با نتایج این آزمایش، والدز-آگویلار (۴۴) بیان داشت که گیاهان به غلظت‌های زیاد بی‌کربنات از طریق کاهش رشد شاخصاره واکنش نشان می‌دهند و این ممانعت در رشد شاخصاره در برگ‌گیرنده کاهش در تعداد برگ‌ها، و ریشه بودند. برای تهیه عصاره، ابتدا ۵٪ گرم از نمونه خشک

بلین صورت بود که از هر گلدان چهار برگ بالغ 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 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 میلی‌لیتری ریخته شد و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۳۵۰۰ سانتریفیوژ گردید. میزان جذب T80 UV/VIS ساخت کشور چین در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر قرائت گردید و میزان کلروفیل a و b با استفاده از فرمول‌های مخصوص محاسبه شد (۲۴).

محتوای نسبی آب برگ

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (Relative water content, RWC) ابتدا از هر گلدان چند دیسک به قطر ۶ میلی‌متر از برگ تازه تهیه و وزن شد. سپس، دیسک‌ها را داخل پتربالون دیش حاوی آب مقطر قرار داده تا سلول‌های برگ به حالت تورژسانس درآیند. پس از گذشت ۶ ساعت، آن‌ها را روی کاغذ صافی قرار داده تا رطوبت اضافی آن‌ها گرفته شود. سپس، آن‌ها را وزن کرده و پس از آن نمونه‌ها را در آون با دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده تا خشک شوند و دوباره وزن آن‌ها محاسبه و با استفاده از فرمول زیر محتوای نسبی آب برگ به دست آمد:

$$RWC = \frac{DW - WW}{TW - DW} \times 100 \quad [۱]$$

که WW وزن تر، DW وزن خشک و TW وزن تورژسانس است.

عناصر غذایی

عناصر غذایی که در این آزمایش اندازه‌گیری شد شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی و ریشه بودند. برای تهیه عصاره، ابتدا ۵٪ گرم از نمونه خشک

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر پارامترهای رویشی (وزن تر ریشه، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه) دو رقم فلفل

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	میانگین مربعات سطح برگ
رقم (C)	۱	۳۱۱/۹۹۳**	۱۲/۸۶**	۴۵۲/۵۵*
کود آهن (F)	۲	۱۵۲/۹۸۲**	۱۰/۷۵**	۴۱/۱۰ns
بی‌کربنات (B)	۱	۳۸۹/۲۷۲**	۵۵۳/۸۱**	۲۲۳۰/۶۷**
(C xF)	۲	۲۸/۲۶۹*	۲۹/۸۵**	۱۳۱/۲۶ns
(C xB)	۱	۴۰/۹۶۰*	۰/۶۳ns	۲۴۲/۲۱ns
(B xF)	۲	۳۵/۰۷۳۲*	۷۵/۰۲**	۲۳۶/۶۲۱ns
(C xF xB)	۲	۷/۹۶۵ns	۲۱/۱۲**	۲۰۴/۸۹۲ns
خطا	۲۴	۶/۷۷	۳/۲۰۱	۷۰/۸۸
ضریب تغییرات		۱۱/۷۶	۱۲/۶۹	۱۰/۵۲۱

*, ** و ns به ترتیب معنی دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی دار

جدول ۲. مقایسه میانگین وزن تر و خشک ریشه فلفل در سطوح مختلف تشییع بی‌کربنات سدیم

منبع آهن (mM)	بی‌کربنات سدیم (mM)	رقم	وزن تر ریشه (گرم در هر گیاه)	وزن خشک ریشه (گرم در هر گیاه)	وزن خشک ریشه (گرم در هر گیاه)
۰		بنanza	۴۴/۹۲dc	۱۲/۹۳de	
Fe-EDDHA		بنanza	۷۸/۵۷a	۲۵/۵۴a	
نانوکلات آهن		بنanza	۵۷/۱۱b	۱۴/۴۸c	
شاهد		گریفاتون	۴۷/۱۶c	۱۲/۹۹dc	
Fe-EDDHA		گریفاتون	۶۰/۲b	۲۱/۱b	
نانوکلات آهن		گریفاتون	۶۲/۴۲b	۲۱/۳۶b	
شاهد	۱۰	بنanza	۲۸/۰۱f	۸/۹۳e	
Fe-EDDHA		بنanza	۳۶/۲۲def	۸/۹۷e	
نانوکلات آهن		بنanza	۳۶/۴۳def	۱۰/۴۳de	
شاهد		گریفاتون	۳۳/۱۳ef	۸/۹۵e	
Fe-EDDHA		گریفاتون	۳۷/۳de	۱۰/۷۵de	
نانوکلات آهن		گریفاتون	۳۶/۹۹de	۱۳/۰۱dc	

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

کمتر، ناشی از تخریب سنتز کلروفیل به دلیل انتقال کم آهن یا قابلیت حل پذیری کمتر آهن در خاک یا محلول محیط کشت می‌شود. در تحقیقی که توسط پیوندی و همکاران (۲) به منظور

وزن تر و خشک و طول ساقه خواهد بود. رشد کاهش یافته شاخصاره، به میزان فتوستنتز کمتر در نتیجه زردی ایجاد شده به وسیله بی‌کربنات در برگ‌ها مربوط می‌شود. میزان فتوستنتز

جدول ۳. مقایسه میانگین وزن تر و خشک اندام هوایی فلفل در سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم

بی‌کربنات سدیم (mM)	منع آهن	وزن تر اندام هوایی (گرم در هر گیاه)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در هر گیاه)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در هر گیاه)
۰	شاهد	۱۹/۴۸c	۱۰۸/۰۷d	۱۹/۴۸c
	Fe-EDDHA	۲۲/۷۴a	۱۷۷/۵۹a	۲۲/۷۴a
	نانوکلات آهن	۲۴/۰۱b	۱۳۴/۲۴b	۲۴/۰۱b
۱۰	شاهد	۱۴/۱۵d	۸۷/۵۳e	۱۴/۱۵d
	Fe-EDDHA	۲۲/۳۰b	۱۱۸/۸c	۲۲/۳۰b
	نانوکلات آهن	۲۰/۰۵c	۱۰۵/۴d	۲۰/۰۵c

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

سدیم و منابع آهن بر طول میوه و تأثیر منابع آهن بر قطر میوه معنی‌دار بود. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که بین ارقام اختلاف معنی‌دار وجود دارد و بیشترین تعداد میوه و وزن میوه در رقم بنanza تولید شد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، بین سطوح صفر و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم از نظر ویژگی‌های زایشی اختلاف معنی‌داری وجود دارد، به‌طوری که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، تعداد میوه، وزن میوه و طول و قطر میوه کاهش یافت (جدول ۶). بر اساس نتایج حاصل از جدول ۷ در خصوص طول میوه، فقط تیمار آهن نانو نسبت به شاهد معنی‌دار است و دارای بیشترین طول میوه است و تیمار شاهد بدون اختلاف با تیمار Fe-EDDHA کمترین طول میوه را دارد. بیشترین میزان قطر میوه مربوط به تیمار Fe-EDDHA و نانوکلات آهن بوده است. برخی گزارش‌ها کاهش رشد ایجاد شده در اثر بی‌کربنات سدیم را به اثر بازدارندگی بی‌کربنات بر فرایندهای متابولیک، اختلال در فعالیت یا رشد ریشه (۲۳ و ۹) و یا حلالیت عناصر (۳۰) نسبت داده‌اند. بنابراین، کاهش غلظت فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی در اندام هوایی گیاه تحت تأثیر بی‌کربنات سدیم می‌تواند بخشی از دلیل کاهش رشد و عملکرد فلفل در مقداری بالای بی‌کربنات سدیم باشد. گیاهان جهت رشد مناسب و تولید میوه بیشتر و به عبارت بهتر عملکرد زیاد، نیازمند ذخایر غذایی کافی و رشد رویشی بیشتر می‌باشند. این سطح مطلوب

بررسی و مقایسه اثر نانوکود کلات آهن و کود کلات آهن معمولی بر عملکرد و رشد گیاه دارویی مرزه انجام گرفت مشاهده شد که گیاهان رشد کرده با نانوکود کلات آهن نسبت به گیاهان رشد کرده با Fe-EDDHA طول ریشه و طول ساقه کوتاه‌تری داشتند. همچنان که در تحقیقات مختلف مشخص شده، با افزایش pH محیط کشت، مؤثرترین و پایدارترین کلات شده، با افزایش Fe-EDDHA است (۲۴). کاهش سطح برگ گیاه به این دلیل است که سلول‌های برگ در شرایط تنش به حداقل رشد خود نمی‌رسند (۲۱). کاهش سطح برگ در گیاه، منجر به کاهش فتوسنتز می‌شود (۲۹) و در نتیجه فراهمی مواد فتوسنتزی برای رشد گیاه کاهش می‌یابد. کاهش در میزان سطح برگ تحت تأثیر تنش بی‌کربنات سدیم برای محصولات گلخانه‌ای متفاوت از جمله گوجه‌فرنگی، رُز و ختمی گزارش شده است (۴۴). در آزمایش حاضر نیز طبق جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) تأثیر رقم و بی‌کربنات سدیم بر سطح برگ فلفل به ترتیب در سطح ۰٪ و ۱٪ معنی‌دار بود. سطح برگ گیاه فلفل تحت تأثیر بی‌کربنات سدیم کاهش یافت و رقم بنanza سطح برگ بیشتری نسبت به رقم گریفاتون داشت (شکل ۱).

ویژگی‌های زایشی

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴) تأثیر رقم و بی‌کربنات سدیم بر تعداد و وزن میوه فلفل و تأثیر بی‌کربنات

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر پارامترهای زایشی (تعداد میوه، وزن میوه، طول میوه، قطر میوه) دو رقم فلفل

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
قطر میوه	طول میوه	وزن میوه	تعداد میوه		
۱۲/۲۲ ^{ns}	۴/۳۲ ^{ns}	۱۰۱۶/۵۲**	۱۷/۳۶**	۱	(C) رقم
۳۵۹/۵۱۷**	۳۵۷/۸۷**	۱۳/۱۰ ^{ns}	۰/۷۷ ^{ns}	۲	کود آهن (F)
۱۰۹/۴۶ ^{ns}	۹۱۹/۸۹**	۶۸۳/۵۴**	۱۲/۲۵**	۱	بی‌کربنات (B)
۱۰/۹۶ ^{ns}	۱/۸۵ ^{ns}	۶/۹۵ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	۲	(C × F)
۰/۰۲ ^{ns}	۱/۴۵ ^{ns}	۳/۵۴ ^{ns}	۱/۳۶ ^{ns}	۱	(C × B)
۱۹/۳۵ ^{ns}	۳۴/۷۱ ^{ns}	۵/۰۹ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۲	(B × F)
۰/۰۵ ^{ns}	۲/۹۴ ^{ns}	۶/۴۲ ^{ns}	۰/۴۴ ^{ns}	۲	(C × F × B)
۳۳/۳۴	۳۵/۶۹	۷۵/۸۹	۰/۵۲	۲۴	خطا
۱۳/۵۴	۱۴/۳۶	۸/۳۳	۱۲/۳۹		ضریب تغییرات

** و ns به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی دار

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر نوع رقم بر تعداد و وزن میوه فلفل

نوع رقم	تعداد میوه	وزن میوه (گرم)
بانانا	۶/۵۵a	۱۰۹/۸۳a
گریفاتون	۵/۱۶b	۹۹/۲b

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم بر تعداد میوه، وزن میوه و طول و عرض میوه فلفل

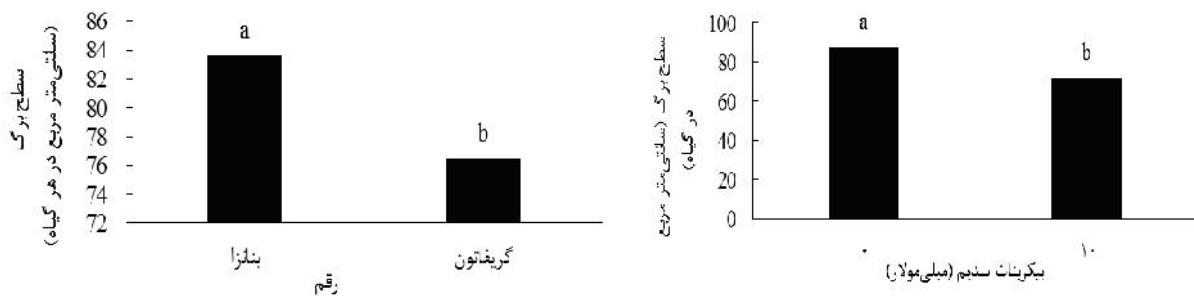
بی‌کربنات سدیم (mM)	تعداد میوه	وزن میوه (گرم)	طول میوه (سانتی متر)	قطر میوه (سانتی متر)
۰	a۶/۴۴	a۱۰۸/۸۷	a۴۶/۶۳	a۴۴/۲۵
۱۰	b۵/۲۷	b۱۰۰/۱۶	b۳۶/۲۵	b۴۰/۷۶

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

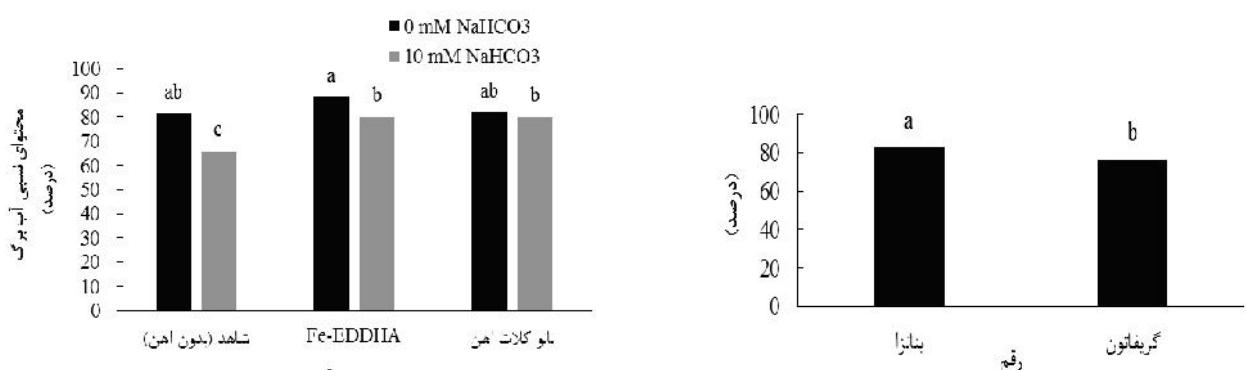
جدول ۷. مقایسه میانگین اثر نوع کود آهن بر قطر و طول میوه فلفل

منبع آهن	قطر میوه (سانتی متر)	طول میوه (سانتی متر)
شاهد	۳۶/۴۱b	۳۶/۸b
Fe-EDDHA	۴۷a	۴۰/۳۹b
نانوکلات آهن	۴۴/۱۱a	۴۷/۵۳a

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند



شکل ۱. تأثیر سطوح بی‌کربنات سدیم و رقم بر سطح برگ فلفل. حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است



شکل ۳. برهمکنش نوع کود آهن و سطوح بی‌کربنات سدیم بر محتوای نسبی آب برگ فلفل حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن می‌باشد

گریفاتون است. همچنین، با توجه به شکل ۳، در غلظت ۱۰ میلی‌مolar بی‌کربنات سدیم در تیمار شاهد و Fe-EDDHA میزان محتوای نسبی آب برگ کاهش معنی‌داری نسبت به غلظت صفر میلی‌مolar داشته است. ولی در تیمارهای کلات آهن نانو، این اختلاف معنی‌دار نبود. در واقع، تنش بی‌کربنات باعث ایجاد اختلالات تغذیه‌ای (۲۲)، کاهش رشد ریشه و توسعه گیاه و سلول می‌شود که در اثر کاهش جذب آب رخ می‌دهد (۳۰ و ۴۵). البته، با توجه به اینکه گیاهان در این تحقیق در محیط کشت بدون خاک رشد کردند، نتایج تحقیقات متعدد نشان داده است که غلظت زیاد بی‌کربنات سدیم حتی تحت محتوای زیاد آب خاک به طور مستقیم سبب کلروز ناشی از

شکل ۲. اثر رقم بر محتوای نسبی آب برگ فلفل حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است

از رشد در صورتی ایجاد می‌گردد که آب و عناصر غذایی به مقدار کافی و میزان بهینه توسط ریشه‌ها جذب گردد (۴۲). در پژوهش حاضر، تعداد میوه نیز تحت تأثیر ۱۰ میلی‌مolar بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری را نشان داد. نتیجه این آزمایش با نتایج محققین مبنی بر کاهش عملکرد میوه فلفل در اثر افزایش کربنات آب، مطابقت دارد (۳۸).

محتوای نسبی آب برگ

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۸) تأثیر رقم، بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر محتوای نسبی آب برگ فلفل در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. نتایج حاصل از شکل ۲ نشان می‌دهد که میزان محتوای نسبی آب برگ در رقم بنanza بیشتر از رقم

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های RWC و رنگدانه‌های گیاه در دو رقم فلفل

منابع تغییرات	آزادی	درجه	RWC	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	میانگین مربعات	کارتونوئیدها
رقم (C)	۱	۳۸۷/۶۹**	۰/۰۰۱۰۵**	۰/۰۰۱۲۶**	۰/۰۰۰۰۷۴۲ns	۰/۰۰۰۰۰۷۴۲ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳**	۰/۰۰۰۰۰۴۳**
کود آهن (F)	۲	۳۴۱/۶۴**	۰/۰۰۲۹۴**	۰/۰۰۱۵۹**	۰/۰۱۸۲**	۰/۰۰۰۰۱۶**	۰/۰۰۰۰۰۱۶**	۰/۰۰۰۰۰۱۶**
بی‌کربنات (B)	۱	۶۷۸/۳۲**	۰/۰۰۰۰۲۶۴*	۰/۰۰۰۰۲۶۳**	۰/۰۰۰۰۸۹۷**	۰/۰۰۰۰۰۰۲۴**	۰/۰۰۰۰۰۰۲۴**	۰/۰۰۰۰۰۰۲۴**
(C x F)	۲	۱۱۳/۱۶ns	۰/۰۰۰۰۹۱۴ns	۰/۰۰۰۰۱۱۳ns	۰/۰۰۰۰۱۰۳ns	۰/۰۰۰۰۰۵۴ns	۰/۰۰۰۰۰۵۴ns	۰/۰۰۰۰۰۵۴ns
(C x B)	۱	۱۱۳/۰ns	۰/۰۰۰۰۱۳۹ns	۰/۰۰۰۰۰۸۸۵ns	۰/۰۰۰۰۰۳۲۶ns	۰/۰۰۰۰۰۷۶ns	۰/۰۰۰۰۰۷۶ns	۰/۰۰۰۰۰۷۶ns
(B x F)	۲	۱۴۱/۵۳*	۰/۰۰۰۰۱۲۹*	۰/۰۰۰۰۱۴۴**	۰/۰۰۰۰۰۶۶۶**	۰/۰۰۰۰۱۰۱*	۰/۰۰۰۰۰۱۰۱*	۰/۰۰۰۰۰۱۰۱*
(C x F x B)	۲	۲۶/۱۲ns	۰/۰۰۰۰۰۳۰۹ns	۰/۰۰۰۰۰۲۲۳ns	۰/۰۰۰۰۰۵۱ns	۰/۰۰۰۰۰۲۴۸ns	۰/۰۰۰۰۰۱۹۳	۰/۰۰۰۰۰۱۹۳
خطا	۲۴	۳۷/۶۱	۰/۰۰۰۰۳۵۴	۰/۰۰۰۰۱۳۱	۰/۰۰۰۰۱۱۲	۰/۰۰۰۰۱۱۲	۱۱/۴۲	۱۴/۷۴
ضریب تغییرات	۷/۵۰	۱۳/۱۹	۱۰/۵۵	۱۱/۴۲	۰/۰۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۰۰۴۳		

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول ۹. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک دو رقم فلفل

منابع تغییرات	آزادی	درجه	F _v /F _m (برگ‌های جوان)	F _v /F _m (برگ‌های پیر)	F _{v/F_m} (برگ‌های پیر)	PI (برگ‌های پیر)	PI (برگ‌های جوان)	میانگین مربعات
رقم (C)	۱	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۶۴۰*	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns
کود آهن (F)	۲	۰/۸۸۶**	۰/۰۰۶۰۶ns	۰/۰۱۸**	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳ns
بی‌کربنات (B)	۱	۰/۱۳۸**	۰/۰۱۳**	۰/۰۰۰۰۰۳۹ns	۰/۰۰۰۰۰۳۹ns	۰/۰۰۰۰۰۳۹ns	۰/۰۰۰۰۰۳۹ns	۰/۰۰۰۰۰۳۹ns
(C x F)	۲	۰/۰۰۰۰۰۵۹ns	۰/۰۰۰۰۰۸۶۰ns	۰/۰۱۵ns	۰/۰۰۰۰۰۱۳ns	۰/۰۰۰۰۰۱۳ns	۰/۰۰۰۰۰۱۳ns	۰/۰۰۰۰۰۱۳ns
(C x B)	۱	۰/۰۰۰۰۰۷۸ns	۰/۰۰۰۰۱۱۱ns	۰/۰۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۰۰۰۸ns
(B x F)	۲	۰/۰۰۰۰۰۱۶۱*	۰/۰۰۰۰۰۴۳۵ns	۰/۰۰۰۰۰۵۳*	۰/۰۰۰۰۰۱۸ns	۰/۰۰۰۰۰۱۸ns	۰/۰۰۰۰۰۱۸ns	۰/۰۰۰۰۰۱۸ns
(C x F x B)	۲	۰/۰۰۰۰۰۲۸۵ns	۰/۰۰۰۰۰۴۳۵ns	۰/۰۰۰۰۰۲۱ns	۰/۰۰۰۰۰۱۵ns	۰/۰۰۰۰۰۱۵ns	۰/۰۰۰۰۰۱۵ns	۰/۰۰۰۰۰۱۵ns
خطا	۲۴	۰/۴۲۲	۰/۰۰۰۰۱۳۳	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۰۱۲
ضریب تغییرات	۱۰/۵۱	۵/۱۰	۱۴/۹۰	۱۲/۳۳	۰/۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰۶		

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

رنگدانه‌های گیاهی و فلورسانس کلروفیل

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۸) تأثیر رقم، بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر کلروفیل a، کلروفیل b و کارتونوئیدهای برگ فلفل معنی‌دار بود. نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۱۰) نشان داد که بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌داری در کلروفیل a، کلروفیل b و کارتونوئیدها در

کمبود آهن شده است (۵۲). بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاهش رشد ریشه، و حتی برگ، با توجه به نقش آن‌ها در جذب و تعرق آب می‌تواند دلیل کاهش محتوای آب برگ باشد. البته در تحقیقی که توسط یانگ و همکاران (۴۶) انجام شد محتوای آب (اختلاف بین وزن تر و خشک) تحت تنش قلیائیت بیشتر از تنش سوری کاهش یافت.

جدول ۱۰. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم و منابع مختلف آهن بر رنگدانه‌های برگ فلفل

کارتوئیدها (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر)	کلروفیل a (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر)	منبع آهن	سطح بی‌کربنات سدیم (mM)
۰/۰۲۲b	۰/۰۲۷b	۰/۰۳۳b	شاهد	۰
۰/۰۳۷a	۰/۰۴۳a	۰/۰۵۵a	Fe-EDDHA	
۰/۰۳۷a	۰/۰۴a	۰/۰۵۴a	نانوکلات آهن	
۰/۰۱c	۰/۰۱۴d	۰/۰۲c	شاهد	۱۰
۰/۰۳۶a	۰/۰۴۲cb	۰/۰۵۳a	Fe-EDDHA	
۰/۰۳۶a	۰/۰۳۸cb	۰/۰۵۳a	نانوکلات آهن	

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

جدول ۱۱. مقایسه میانگین اثر رقم بر رنگدانه‌های فتوستزی برگ فلفل

رقم	کارتوئیدها (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر) b	کلروفیل (میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر) a	بنانزا
۰/۰۳۳a	۰/۰۴a	۰/۰۴۸a	
۰/۰۲۶b	۰/۰۲b	۰/۰۳۹b	گریفاتون

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

کمترین میزان را داشت و اختلاف معنی‌داری با بقیه تیمارها داشت. با توجه به جدول ۱۲، در برگ‌های جوان و در غاظت ۱۰ میلی‌مولا ر بی‌کربنات سدیم در تیمار شاهد و تیمار آهن نانو کاهش معنی‌داری در نسبت کلروفیل فلورسانس متغیر به حداقل، نسبت به غاظت صفر میلی‌مولا رخ داد. ولی در تیمار Fe-EDDHA کاهش معنی‌داری در کلروفیل فلورسانس متغیر به حداقل مشاهده نشد. بیشترین مقدار کلروفیل فلورسانس متغیر به حداقل مربوط به رقم بنانزا بود و در برگ‌های پیر در غاظت ۱۰ میلی‌مولا ر بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری در شاخص مذکور نسبت به غاظت صفر میلی‌مولا ر بی‌کربنات سدیم رخ داد. بر اساس گزارش‌های موجود، کلروپلاست و رنگدانه‌های گیاهی موجود در آن تحت تنش قلیائیت قرار می‌گیرند. عوامل گوناگونی مسئول این کاهش در میزان کلروفیل هستند، که از آن جمله می‌توان به نقش آهن در ساختن کلروفیل و پروتئین‌های کلروپلاست سلول برگ و همچنین عدم توانایی آهن برای توزیع متعادل در برگ اشاره کرد (۲۷). مطابق با

تیمار شاهد شد؛ هر چند که در مورد کلروفیل a اختلافی بین سطوح منابع آهن مشاهده نگردید. میزان این رنگدانه‌ها در رقم بنانزا بیشتر از گریفاتون بود (جدول ۱۱). کارتوئیدها گروهی از مولکول‌های بزرگ ایزوپرونئیدی هستند که نقش مهم و ضروری در فتوستز و محافظت نوری دارند و به هیدروکربن‌های کاروتون مانند لیکوپین، بتاکاروتون یا گزانتوفیل‌ها تقسیم می‌شوند. دو عمل مهم کارتوئیدها عبارت است از: محافظت کلروفیل در برابر اکسیداسیون نوری و جذب و انتقال انرژی فوتون‌هایی با طول موج کوتاه به کلروفیل a (۱۶). گزارش شده که کاهش مقدار کارتوئیدها در شرایط تنش نیز به علت تجزیه بتاکاروتون و تشکیل زآزاتین در چرخه گزانتوفیل است (۳۹). محققین گزارش دادند که در تنش‌های شدید طولانی مدت، سنتز آنزیم پروفوبلینوژن دی آمیناژ افزایش می‌یابد. این آنزیم نقش کلیدی در سنتز تراپیرول‌ها دارد که پیش‌ماده ساخت کلروفیل‌ها و پورفیرین‌ها است (۴۱). در مورد کارتوئیدها در غاظت ۱۰ میلی‌مولا ر، تیمار شاهد (بدون آهن)

جدول ۱۲. مقایسه میانگین برهmekنش سطوح مختلف تنش بی کربنات سدیم و نوع کود آهن بر ویژگی‌های فتوستزی برگ جوان فلفل

PI (برگ‌های جوان)	F _v /F _m (برگ‌های جوان)	منبع آهن	سطح بی کربنات سدیم (mM)
۲/۱۱c	۰/۴۲d	شاهد	۰
۲/۶۲a	۰/۸۸a	Fe-EDDHA	
۲/۵۸b	۰/۷۳b	نانوکلات آهن	
۱/۶۳d	۰/۲۱e	شاهد	۱۰
۳/۳۴a	۰/۸۱a	Fe-EDDHA	
۱/۵d	۰/۶۳c	نانوکلات آهن	

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

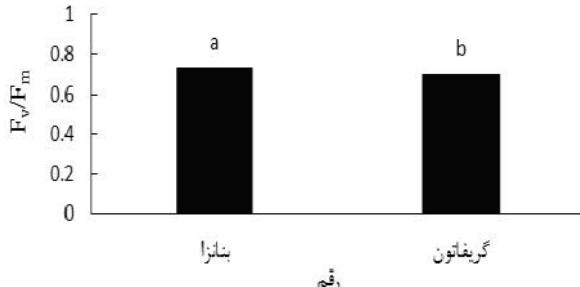
جدول ۱۳. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تنش بی کربنات سدیم بر ویژگی‌های فتوستزی برگ پیر فلفل

PI (برگ‌های پیر)	F _v /F _m (برگ‌های پیر)	سطح بی کربنات سدیم (mM)
۲/۲۴a	۰/۷۳a	۰
۱/۸۵b	۰/۶۹b	۱۰

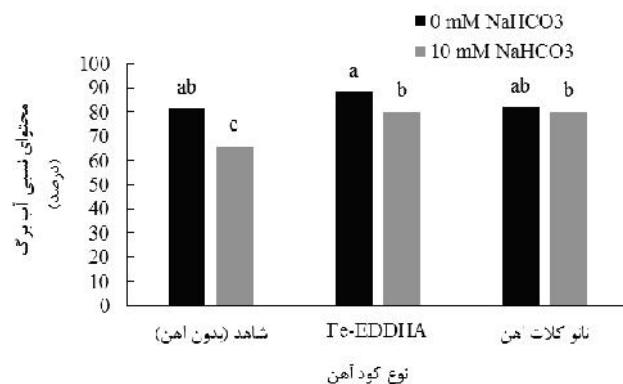
در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

یکی از راه‌های شناسایی بخش‌های آسیب‌دیده دستگاه فتوستزی است. در پژوهشی که به‌منظور بررسی تأثیر تنش شوری و ترکیب شوری و قلیائیت بر گیاه آفتابگردان انجام گرفت مشخص شد که تحت تنش شوری، مقدار F_v/F_m تغییری نکرد. ولی تحت تنش ترکیب شوری و قلیائیت، میزان کاهش F_v/F_m قابل ملاحظه بود. دلیل کاهش F_v/F_m تحت تنش ترکیب شوری و قلیائیت به اثرهای مخرب pH زیاد، از جمله از بین بردن دستگاه فتوستزی و پذیرنده‌های الکترون، کاهش کارایی فلورسانس، تضعیف فعالیت فتوسیستم II و کاهش واکنش‌های فتوشیمیایی نسبت داده شد (۲۵). در این آزمایش، طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۹)، تأثیر بی کربنات سدیم و منابع آهن بر F_v/F_m برگ‌های جوان معنی‌دار بود. در مقایسه با شاهد بی کربنات سدیم باعث کاهش F_v/F_m و PI شد (جدول ۱۳) و کاربرد کود Fe-EDDHA نسبت به نانوکلات آهن در جلوگیری از این کاهش مؤثرتر بود (جدول ۱۲). دلیل

نتایج این پژوهش، میزان کلروفیل گوجه‌فرنگی (۳۲) و ذرت (۱۵) نیز تحت تیمار بی کربنات سدیم کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت. کاهش غلظت کلروفیل، قدرت رشد و مقاومت به تنش را در گیاه کاهش می‌دهد (۴۷). کلروفیل فلورسانس یکی از راه‌های مصرف انرژی برانگیختگی در فتوستز است که به‌طور گسترده‌ای در پژوهش‌های فتوستز به کار گرفته می‌شود. همچنین، از کلروفیل فلورسانس برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و میزان آسیب واردہ به دستگاه فتوستزی استفاده می‌شود (۱۷). نسبت F_v/F_m حداکثر کارایی کواتسومی فتوسیستم II برای تبدیل نور جذب شده به انرژی شیمیایی را نشان می‌دهد. تنش‌های محیطی که کارایی فتوسیستم II را تحت تأثیر قرار می‌دهند باعث کاهش نسبت F_v/F_m می‌شوند (۱۴). تنش‌های علاوه بر آسیب مستقیم بر دستگاه فتوستزی، باعث خسارت به سیستم انتقال الکترون و فعالیت آنزیم رویسکو می‌شوند (۳۵). تجزیه و تحلیل تغییرات کلروفیل فلورسانس



شکل ۴. اثر رقم بر F_v/F_m در برگ‌های پیر فلفل حروف متفاوت در اعداد هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ آزمون دانکن است



شکل ۳. برهمکنش نوع کود آهن و سطوح بی‌کربنات سدیم بر محظای نسبی آب برگ فلفل حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن می‌باشد

شدید، میزان شاخص کارایی فتوستتری در مقایسه با شاهد کاهش قابل توجهی داشت. آن‌ها همچنین بیان کردند که محدودیت غیر روزنایی، یعنی کاهش فعالیت فتوستتری در فتوسیستم II نقش مهمی در کاهش میزان فتوستتری در تنفس شوری-قليایی زیاد بازی می‌کند. از عوامل غیر روزنایی مؤثر بر فتوستتری می‌توان پتانسیل آب برگ، ترکیبات بیوشیمیایی (۳۶)، محظای رنگیزهای فتوستتری (۴۶) و تجمع یون‌های سمی در سیتوسول (۲۰) را نام برد. با استناد به نتایج این پژوهشگران، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاهش رنگیزهای فتوستتری تحت تیمارهای بی‌کربنات سدیم ممکن است بخشنده از دلیل کاهش شاخص کارایی فتوستتری باشد.

عناصر غذایی

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول‌های ۱۴ و ۱۵) تأثیر بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر غلظت کلسیم و نیتروژن در برگ و ریشه فلفل در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. ولی اثر آنها بر غلظت پتاسیم معنی‌دار نبود. اثر بی‌کربنات بر غلظت فسفر و نیتروژن در برگ و غلظت کلسیم، پتاسیم، فسفر و نیتروژن در ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول‌های ۱۶ و ۱۷) تأثیر بی‌کربنات سدیم و منابع

این موضوع را می‌توان به کارایی زیاد کود در Fe-EDDHA شرایط قليایی دانست، به‌طوری‌که در سطح ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، کلات آهن بدون تشکیل کمپلکس با عناصر قليایی، آهن را آزاد کرده و در اختیار گیاه قرار می‌دهد. آهن به‌طور مستقیم در چرخه فتوستتری گیاه دخالت دارد و تولید مواد غذایی هم با افزایش بازده فتوستتر در ارتباط است. اگرچه تولید مواد غذایی به فاکتورهای دیگری هم بستگی دارد، اما اگر فتوستتر گیاه افزایش پیدا کند تولید مواد غذایی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. میزان F_v/F_m در برگ‌های پیر رقم بنازرا بیشتر از رقم گریفاتون بود (شکل ۴).

شاخص کارایی دستگاه فتوستتری (PI)

نتایج به‌دست‌آمده در مورد فلفل تحت تنفس قلياییت نشان داد که تیمار بی‌کربنات سدیم در مقایسه با شاهد، میزان شاخص کارایی فتوستتری (Performance Index) (PI) را در تمام تیمارها به میزان قابل توجهی کاهش داد، به‌طوری که بیشترین میزان PI مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود (جدول‌های ۱۲ و ۱۳). مطابق با نتایج این پژوهش، دنگ و همکاران (۱۵) نتیجه گرفتند که شاخص کارایی فتوستتری به تدریج با افزایش تنفس شوری-قلياییت کاهش یافت، به‌طوری که تحت تنفس شوری-قلياییت

جدول ۱۴. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر تیمارهای مختلف بر مقدار عناصر پرمصرف برگ در دو رقم فلفل

میانگین مربuat					منابع تغییرات
نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	درجه آزادی	
۰/۰۹۱۳ns	۰/۰۰۲۷۶ns	۴۱/۹۹۰ns	۰/۰۷۳۸ns	۱	(C) رقم
۱۱/۱۱۷**	۰/۰۰۳۸۹ns	۵۰۳/۱۰۰ ns	۴/۳۵۱**	۲	(F) کود آهن
۸/۸۷۱**	۰/۱۲۳**	۴۲۷/۹۳۸ ns	۴/۷۳۰ns	۱	(B) بی‌کربنات
۰/۰۰۱۶۵ns	۰/۰۰۰۰۵۱۰ ns	۱۷۱/۵۳۴ns	۰/۰۴۴۸ns	۲	(C xF)
۰/۰۰۱۳۰ns	۰/۰۰۴۵۰ns	۷/۰۰۷ns	۰/۱۳۰ns	۱	(C xB)
۰/۰۶۹۳ns	۰/۰۰۱۶۴ns	۱۱۳۰ ns	۰/۱۱۳**	۲	(B xF)
۰/۰۰۸۴۷ns	۰/۰۰۷۳۸ns	۳۹/۱۸۲ns	۰/۰۱۱۳ns	۲	(C xF xB)
۰/۰۵۲۲	۰/۰۰۳۴۳	۱۵۵/۷۴۱	۰/۰۳۲۳	۲۴	خطا
۸/۲۱	۱۳/۱۷	۶/۳۵	۹/۶۳		ضریب تغییرات

** و ns بهترتب معنی دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی دار

جدول ۱۵. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر تیمارهای مختلف بر عناصر پرمصرف ریشه در دو رقم فلفل

میانگین مربuat					منابع تغییرات
نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	درجه آزادی	
۰/۰۴۸۶ns	۰/۰۰۴۸۳ns	۵۳۷/۷۷۷**	۰/۰۰۰۰۰۰۲۵ns	۱	(C) رقم
۱۲/۴۵۱**	۰/۰۴۹۰**	۶۶/۲۶ns	۰/۵۷**	۲	(F) کود آهن
۱۱/۳۱۳**	۰/۲۱۰**	۳۵۳۹۲/۸۹**	۰/۳۶**	۱	(B) بی‌کربنات
۰/۰۰۳۵۰ns	۰/۰۰۰۲۹۴ns	۴۰/۱۷۰ns	۰/۰۰۱ns	۲	(C xF)
۰/۰۰۲۰۷ns	۰/۰۰۱۰۸ns	۴۴۵/۰۶**	۰/۰۰۳۶ns	۱	(C xB)
۰/۱۹۶*	۰/۰۲۱۷*	۹۳/۸۵ns	۰/۰۰۲۶*	۲	(B xF)
۰/۰۲۰۰ns	۰/۰۰۲۲۷ns	۵۶/۱۸ns	۰/۰۰۰۲۰۴ns	۲	(C xF xB)
۰/۰۴۸۷	۰/۰۰۰۷۰	۳۳/۹۳	۰/۰۰۰۵۹	۲۴	خطا
۶/۶۱	۶/۲۱	۱۱/۸۷	۷/۶۲		ضریب تغییرات

**, * و ns بهترتب معنی دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی دار

میلی مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی دار میزان نیتروژن برگ نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم شد (جدول ۲۰). در ریشه نیز در غلظت ۱۰ میلی مولار بی‌کربنات سدیم، در تمام تیمارهای کودی، مقدار نیتروژن نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم کاهش پیدا کرد. در مورد عنصر فسفر، غلظت ۱۰ میلی مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی دار میزان

آهن بر غلظت آهن، منگنز، روی و مس در برگ و ریشه فلفل در سطح ۱٪ معنی دار بود. کمترین مقدار نیتروژن در تیمار شاهد (بدون آهن) مشاهده شد (جدول ۱۸). نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۹) نشان داد اختلاف معنی داری بین کلات‌های آهن نانو و Fe-EDDHA وجود نداشت و کمترین نیتروژن برگ در تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین، غلظت ۱۰

جدول ۱۶. نتایج تجزیه واریانس مربوط به عناصر کم‌صرف برگ در گیاه فلفل

منگنز	آهن	مس	روی	درجه آزادی	منابع تغییرات
میانگین مربعات					
۴۰/۱۱۱ ^{ns}	۲۴۸/۵۸ ^{ns}	۰/۰۹۰۰ ^{ns}	۵۸/۲۶ ^{ns}	۱	(C) رقم
۱۵۶۸/۲۲۵**	۱۰۵۹۴/۴۶**	۰/۲۰۵ ^{ns}	۱۷۴۱/۵۶**	۲	(F) کود آهن
۱۶۱۳/۳۶۱**	۸۰۹۳/۲۹**	۹۴/۷۳۷**	۱۴۹۷/۶۹**	۱	(B) بی‌کربنات
۱۲/۱۶۱ ^{ns}	۱۲۶/۹۹ ^{ns}	۰/۱۵۷ ^{ns}	۳۹/۹۷ ^{ns}	۲	(C × F)
۰/۱۶۰ ^{ns}	۸۵/۲۵ ^{ns}	۰/۰۹۰۰ ^{ns}	۱۷/۶۴ ^{ns}	۱	(C × B)
۱۹۴/۴۳۸**	۲۳۲/۰۴*	۰/۲۰۱ ^{ns}	۳۶/۴۴ ^{ns}	۲	(B × F)
۹/۲۲۷ ^{ns}	۴۳/۱۳ ^{ns}	۰/۰۷۵۸ ^{ns}	۱۲/۵۰ ^{ns}	۲	(C × F × B)
۲۱/۳۲	۶۵/۳۸	۰/۰۶۱۶	۲۲۰/۸۰۱	۲۴	خطا
۱۱/۳۳	۱۲/۴۶	۲/۳۵	۸/۰۰۰۷		ضریب تغییرات

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

جدول ۱۷. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر تیمارهای مختلف بر مقدار عناصر کم‌صرف ریشه در دو رقم فلفل

منگنز	آهن	مس	روی	درجه آزادی	منابع تغییرات
میانگین مربعات					
۲۷/۹۱۳ ^{ns}	۱۱۸/۴۴ ^{ns}	۱/۷۷۷ ^{ns}	۲۶/۲۴ ^{ns}	۱	(C) رقم
۶۴۳/۳۰۰**	۲۸۴۶۲/۴۸**	۵۸/۲۰۷**	۱۷۱۳/۹۰**	۲	(F) کود آهن
۲۶۰۹/۵۰۶**	۵۴۹۸/۲۲**	۵۳/۷۷۷**	۱۵۶۲/۸۸**	۱	(B) بی‌کربنات
۵۰/۷۱۸ ^{ns}	۱۶۷/۳۷ ^{ns}	۰/۴۸۰ ^{ns}	۴۹/۱۱ ^{ns}	۲	(C × F)
۱۴۲/۸۰۲ ^{ns}	۱۶/۹۴ ^{ns}	۰/۱۱۱ ^{ns}	۱۱/۳۳ ^{ns}	۱	(C × B)
۱۳۳/۸۴۵ ^{ns}	۷۴/۷۰ ^{ns}	۰/۱۰۰ ^{ns}	۳۷/۴۶ ^{ns}	۲	(B × F)
۱۰۹/۲۵۵ ^{ns}	۱۱/۵۵ ^{ns}	۰/۰۳۸ ^{ns}	۸/۱۱ ^{ns}	۲	(C × F × B)
۴۷/۹۷۰	۶۷/۹۱	۰/۹۰۴	۱۹/۲۶۱	۲۴	خطا
۱۰/۴۳۶	۹/۱۹	۹/۹۰۴	۷/۱۵		ضریب تغییرات

** و ns به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی دار

با توجه به شکل ۵، بین تیمارهای کودی Fe-EDDHA و کلات آهن نانو نسبت به شاهد اختلاف معنی داری از لحاظ پتاسیم وجود داشت، به طوری که تیمار شاهد دارای کمترین میزان پتاسیم بود. همچنان، با توجه به شکل ۶، در هر دو رقم، کاهش معنی داری در میزان پتاسیم ریشه در غلظت زیاد

فسفر برگ نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم شد (جدول ۲۰). در ریشه، با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۹) در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی داری در میزان فسفر نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد، و این کاهش در تیمار شاهد بیشتر بود.

جدول ۱۸. مقایسه میانگین اثر نوع کود آهن بر غلظت عناصر نیتروژن، آهن و روی، مس، منگنز در اندام هوایی و ریشه فلفل

منبع آهن (درصد وزن خشک)	نیتروژن		روی		مس		آهن		منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم)
	اندام هوایی	روی	اندام هوایی	روی	اندام هوایی	مس	اندام هوایی	آهن	
شاهد	۱/۶۷a	۶۵/۰۵a	۷۵/۰۵a	۱۲/۱۲a	۳۳/۶b	۷۴/۸۱a	ریشه	آهن	ریشه
Fe-EDDHA	۳/۳۵b	۴۵/۵۵b	۵۵/۱۳b	۸/۶b	۱۲۱/۹a	۶۲/۲۸b	ریشه	آهن	ریشه
نانوکلات آهن	۳/۳۲b	۴۳/۰۵b	۵۳/۰۸b	۸b	۱۱۳/۳a	۶۱/۹۹b	ریشه	آهن	ریشه

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

جدول ۱۹. مقایسه میانگین برهmekش نوع کود و سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، کلسیم، آهن و روی، مس، منگنز در اندام هوایی و ریشه فلفل

سطح بدی‌کربنات سدیم (mM)	کلسیم		فسفر		نیتروژن		آهن		منبع آهن (درصد وزن خشک)
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	آهن	
۰	۰/۱۴c	۰/۲۵c	۰/۴۷b	۲/۵۷c	۴۳/۳۱e	۵۴/۲۶a	برگ	آهن	برگ
Fe-EDDHA	۰/۲۶a	۰/۴۰a	۰/۵۱a	۴/۵۹a	۱۵۹/۵۸a	۳۹/۴۶b	برگ	آهن	برگ
نانوکلات آهن	۰/۲۵a	۰/۳۹a	۰/۵a	۴/۵۲a	۱۲۸/۰۳b	۴۳/۷۶b	برگ	آهن	برگ
شاهد	۰/۰۹d	۰/۲۲d	۰/۲۲d	۷۸/۱d	۱۷/۲۱f	۵۰/۱۱a	برگ	آهن	برگ
Fe-EDDHA	۰/۱۷b	۰/۳۲b	۰/۴۲c	۲/۳۳b	۱۰۹/۲۱c	۲۲/۳۵c	برگ	آهن	برگ
نانوکلات آهن	۰/۱۸b	۰/۳۱b	۰/۳۹c	۲/۲۵b	۹۸/۶۸d	۲۴/۸۶c	برگ	آهن	برگ

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

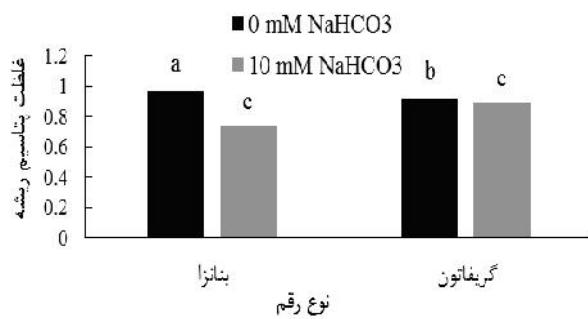
جدول ۲۰. مقایسه میانگین اثر سطوح بی‌کربنات سدیم بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، آهن و روی، مس، منگنز در اندام هوایی و ریشه فلفل

سطح بدی‌کربنات سدیم (mM)	فسفر		نیتروژن		آهن		مس		منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم)
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	آهن	
۰	۰/۵a	۳/۲۸a	۵۷/۶۷a	۶۷/۳۹a	۱۰۱/۹a	۷۴/۸۷a	ریشه	آهن	ریشه
۱۰	۰/۳۸b	۲/۲۸b	۴۴/۷۷b	۵۴/۷۷b	۸/۳۷b	۷۷/۲b	۵۷/۸۵b	آهن	ریشه

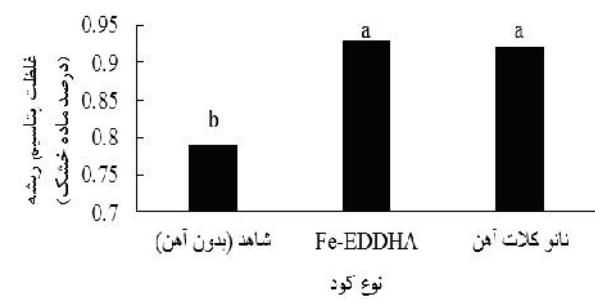
در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

در مورد عنصر کلسیم، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در مقایسه با غلظت صفر بی‌کربنات سدیم، کاهش در میزان کلسیم برگ وجود داشت. تفاوت معنی‌داری بین

بی‌کربنات مشاهده شد. بیشترین پتاسیم ریشه مربوط به رقم بنانزا بود. ولی در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات تفاوت معنی‌داری بین دو رقم مشاهده نشد.



شکل ۶. برهمکنش سطوح بی‌کربنات سدیم و رقم بر میزان پتانسیم ریشه فلفل حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است



شکل ۵. اثر نوع کود بر میزان پتانسیم ریشه فلفل حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشانه اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪ آزمون دانکن است.

آهن نانو و Fe-EDDHA اختلاف معنی داری مشاهده نشد (جدول ۱۹). همچنین، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی داری در میزان منگنز ریشه نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد (جدول ۲۰).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمار ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی داری در میزان روی برگ و ریشه، نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات شد (جدول ۲۰). در مورد اثر نوع کود، با توجه به نتایج مقایسه میانگین، بیشترین میزان روی در برگ و ریشه مربوط به تیمار شاهد (بدون آهن) و کمترین آن مربوط به تیمار آهن نانو و Fe-EDDHA بود (جدول ۱۸).

طبق نتایج مقایسه میانگین (جدول ۱۹)، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی داری در محتوای آهن برگ گیاه فلفل در تمام تیمارهای کودی نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد. در ریشه نیز طبق نتایج مقایسه میانگین (جدول‌های ۱۸ و ۲۰) در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم میزان آهن کاهش معنی داری نشان داد، و کمترین میزان آهن مربوط به تیمار شاهد بود و بین تیمارها نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی داری وجود دارد.

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

تیمارهای Fe-EDDHA و نانوکود آهن مشاهده نشد (جدول ۱۹). در خصوص میزان کلسیم ریشه، نتایج بدین صورت بود که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در همه‌ی تیمارهای کودی کاهش معنی داری در میزان کلسیم ریشه نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد، و کمترین غلظت کلسیم در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۱۹).

نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲۰) نشان داد که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار کاهش معنی داری در میزان مس برگ نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد. در ریشه، در مورد اثر نوع کود، با توجه به جدول ۱۸ بیشترین مقدار مس ریشه متعلق به تیمار شاهد (بدون آهن) بود و بین منابع آهن تفاوت معنی داری مشاهده نشد. طبق جدول ۲۰، غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی دار میزان مس ریشه نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم شد.

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۹)، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در تیمار Fe-EDDHA و نانوکلات آهن میزان منگنز برگ نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات کاهش معنی داری داشت. اما در تیمار شاهد (بدون آهن) تفاوت معنی داری مشاهده نشد، و در هر دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم بیشترین مقدار منگنز برگ مربوط به تیمار شاهد (بدون آهن) بود. در ریشه نیز بیشترین میزان منگنز مربوط به تیمار شاهد (بدون آهن) بود و بین تیمار

آنtagونیستی بین آهن و روی در تحقیقات مختلف اشاره شده است. کاهش قابلیت دسترسی روی در شرایط قلیایی و با افزایش pH قبلاً گزارش شده است (۵۰ و ۲۲). البته در این آزمایش، بیشترین غلظت روی برگ مربوط به تیمار شاهد بود که می‌تواند به دلیل کمبود آهن و در نتیجه کاهش رقابت آهن و روی و افزایش جذب روی باشد. با توجه به تحقیقات مختلف، تیمار بی‌کربنات سبب کاهش غلظت آهن در بافت‌های گیاه فلفل تیمار شده نسبت به شاهد شده است (۳۴). کمبود عنصر آهن به دلیل اینکه در فرایندهای فتوستتر و در تشکیل مولکول کلروفیل نقش دارد، سبب کلروز آهن با زردی در برگ‌های جوان (به دلیل جلوگیری از سنتز کلروفیل در کلروپلاست) می‌شود (۲۶). کمبود آهن ممکن است به دلیل کمبود آهن قابل دسترس در اثر غلظت زیاد کربنات و رابطه‌ی آن با pH زیاد باشد (۲۶ و ۳۳). در ریشه، غلظت آهن نسبت به برگ خیلی بیشتر بود. افزایش میزان آهن در ریشه، تحت افزایش pH آپوپلاست باشد که در تحقیقات آریا و روی (۱۲) نیز به آن اشاره شده است. 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. کلات، یک کمپلکس پایدار مشکل 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 (۱۰). با توجه به نتایج به دست آمده، Fe-EDDHA به دلیل حلایت و پایداری بیشتر در محلول، دارای قابلیت بیشتری برای جذب توسط فلفل بوده و در نتیجه موجب افزایش رشد فلفل می‌شود. بنابراین، با توجه به اهمیت آهن در تغذیه گیاه، مصرف کود Fe-EDDHA در شرایط قلیائیت بهترین منبع تأمین آهن برای فلفل است.

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 کم نیاز بین $\frac{5}{8}$ تا $\frac{6}{4}$ است. در این پژوهش، بی‌کربنات سدیم بر جذب عناصر پرمصرف و کم‌صرف تأثیرگذار بود. احیاء ^{34}Fe ممکن است توسط pH زیاد آپوپلاست متوقف شود و انتقال آهن به اندام هوایی متوقف گردد (۲۸ و ۵۰). بی‌کربنات از طریق افزایش pH شیره سلولی در درون آوندها در نهایت سبب رسوب و غیرفعال شدن برخی از عناصر غذایی نظری فسفر، آهن و روی در گیاه می‌گردد و نیز اثر متقابل آن با سایر یون‌ها باعث ایجاد اختلال در رشد و در نتیجه کاهش محصول می‌گردد (۶). لیگاندهای EDDHA با کلاته کردن آهن و کلسیم مانع از تشکیل فسفات‌های آهن و کلسیم کم محلول می‌شوند و در نتیجه فراهمی فسفر برای گیاه افزایش می‌یابد. از طرفی، یک همبستگی مثبت بین فسفر و آهن وجود دارد (۳۷ و ۴۰). بر این اساس، کمبود فسفر می‌تواند سبب جبران کمبود آهن شود (۴۸).

طبق نتایج آزمایش‌های مختلف پیرامون این موضوع، وجود غلظت زیاد بی‌کربنات در محیط ریشه، ظرفیت جذب بی‌کربنات یا دی‌اکسید کربن توسط ریشه را افزایش داده، کلسیم به صورت کربنات کلسیم در ریشه رسوب و غلظت اگزالات افزایش می‌یابد که رسوب کلسیم در ریشه و عدم انتقال آن به اندام هوایی می‌تواند دلیل کاهش کلسیم در اندام هوایی در این غلظت باشد (۶). تجمع سدیم و پتاسیم در بافت‌های گیاهی ارتباط آنtagونیستی دارند. به عبارت دیگر، افزایش میزان سدیم باعث کاهش میزان پتاسیم می‌شود (۱۹).

با افزایش pH، مقدار مس قابل جذب در خاک کم می‌شود و همچنین تشکیل ترکیبات غیر محلول مس در خاک مثل فسفات، کربنات و سولفید مس نیز از مس قابل جذب گیاه می‌کاهد (۵). همچنین، در تیمارهای با pH زیاد، قابلیت دسترسی منگنز به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (۳۱). رابطه

نتیجه‌گیری

Fe-EDDHA و آهن نانو، نتایج کاملاً رضایت‌بخشی حاصل شد. ولی در شرایطی که غلظت بی‌کربنات سدیم بالا باشد، بهتر است از کود Fe-EDDHA استفاده شود. با توجه به نوظهور بودن فناوری نانو و روند رو به رشد تحقیقات، نانوکودها می‌توانند جایگزین خوبی برای کلات‌های آهن باشند. البته این نکته نیز قابل ذکر است که اثر کلات‌ها در فراهمی عناصر غذایی برای گیاه در محیط‌های کشت بدون خاک با اثر آن‌ها در خاک متفاوت است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از گروه علوم باگبانی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان به خاطر استفاده از گلخانه‌ی هیدرопونیک برای انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

با بررسی نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مشخص شد که تنش قلیائیت ناشی از افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم سبب کاهش ویژگی‌های رویشی و زایشی در گیاه فلفل شد. علاوه بر این، تحت تنش بی‌کربنات سدیم، گیاهان رشد کرده با محلول غذایی بدون آهن دارای کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ بودند. طبق نتایج حاصله در این آزمایش، زمانی که از منبع کودی بدون آهن استفاده شد، با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، گیاهان کلروز شدیدی را نشان دادند این نتیجه نشان‌دهنده نقش آهن در تشکیل مولکول کلروفیل است. همچنین، غلظت ۱۰ میلی‌مولا ر بی‌کربنات سدیم سبب کاهش جذب عناصر غذایی توسط گیاه شد. در این آزمایش، در غلظت بالای بی‌کربنات سدیم (۱۰ میلی‌مولا) با استفاده از منابع کودی

منابع مورد استفاده

۱. پرداختی، ع.، ر. نظران، ح. حکم‌آبادی و م. آشتیانی. ۱۳۸۵. نقش فضای سبز در کاهش آلودگی هوا و اثر کود جدید کلات آهن خضراء در افزایش کارایی گیاهان و تلطیف هوا. اولین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، ۳۰ بهمن تا ۱ اسفندماه، دانشگاه تهران.
۲. پیوندی، م.، ه. پرنده و م. میرزا. ۱۳۹۱. مقایسه تأثیر نانوکلات آهن با کلات آهن بر پارامترهای رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ریحان (*Ocimum Basilicum*). مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی - مولکولی ۴(الف): ۸۹-۹۹.
۳. تایز، ل. و ا. زایگر. ۲۰۰۲. فیزیولوژی گیاهی. خانه زیست‌شناسی، ویرایش سوم، تهران، ۷۸۰ صفحه.
۴. رosta، ح. ر. و ع. ر. سجادی‌نیا. ۱۳۸۸. اثرهای محلول‌پاشی نوعی کود کلات آهن بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی چهار رقم پسته تجاری ایران. مجله علوم فنون باگبانی ایران ۱۰: ۲۶۳-۲۷۴.
۵. علی‌پور، ح. و س. ج. حسینی فرد. ۱۳۸۵. تشخیص و رفع کمبود عناصر غذایی در پسته. انتشارات مؤسسه تحقیقات پسته کشور، ۵۳ صفحه.
۶. ملکوتی، م. ج. و ع. ا. شهابی. ۱۳۸۲. نقش بی‌کربنات در بروز ناهنجاری‌های تغذیه‌ای درختان میوه. انتشارات سنا، ۱۰۸ صفحه.
۷. نادری، م. و ع. دانش شهرکی. ۱۳۹۰. کاربرد فناوری نانو در بهینه‌سازی فرمولاسیون کودهای شیمیایی. ماهنامه فناوری نانو ۴(۱۶۵): ۲۰-۲۲.
8. Abadia, J., S. Vazquez, R. Rellán-Alvarez and H. El-Jendoubi. 2011. Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis. *Plant Physiol. Biochem.* 49: 471-482.
9. Alhendawi, R.A., V.E. Romheld, 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.

10. Aref, F. 2011. Iron, copper and manganese concentration in maize leaf as influenced by soil and foliar application of zinc sulfate and boric acid. Int. J. Acad. Res. 3: 1080-1087.
11. Argo, B. 2003. Understanding pH management and plant nutrition, Part 5: Choosing the “best” fertilizer. J. Int. Phalaenopsis Alliance Vol. 13(4): 1-6.
12. 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: 707-711.
13. Banaei, M.H., A. Moameni, M. Baybordi and M.J. Malakouti. 2005. The soils of Iran, new achievements in perception, managements and use. Sana Publication, Tehran, Iran.
14. Calatayud, A. and E. Barreno. 2004. Response to ozone in two lettuce varieties on chlorophyll a fluorescence, photosynthetic pigments, and lipid peroxidation. Plant Physiol. Biochem. 42: 549-555.
15. 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. Bulg. J. Agric. Sci. 16(1): 49-58.
16. Diedrick, K. 2010. Manganese fertility in soybean production. Pioneer Hi-Bred Agron. Sci. 20(14): 15-20.
17. Hakam, N., Sh. Khanizadeh, J.R. DeEll and C. Richr. 2000. Assessing chilling tolerance in roses using chlorophyll fluorescence. HortSci. 35: 184-186.
18. Hoagland, D.R. and D.I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Calif. Agric. Exp. Sta. Circ. 347: 1-32.
19. Husain, S., S.V. Caemmerer and R. Munns. 2004. Control of salt transport from roots to shoots of wheat in saline soil. Func. Plant Biol. 31: 1115-1126.
20. James, R.A., R. Munns, S. Von Caemmerer, C. Trejo, C. Miller and T. Condou. 2006. Photosynthetic capacity is related to the cellular and subcellular partitioning of Na⁺, K⁺ and Cl⁻ in salt affected barley and durum wheat. Plant Cell Environ. 29: 2185-2197.
21. Karlberg, L., A. Ben-Gal, P.E. Jansson and U. Shani. 2006. Modeling transpiration and growth in salinity stressed tomato under different climatic conditions. Ecol. Model. 190: 15-40.
22. Kopittk, P.M. and N.W. Menzies. 2004. Control of nutrient solutions for studies at high pH. Plant Soil 266: 343-354.
23. Kosegraten, H., U. Schwed, G. Wilson and K. Mengel. 1998. Comparative investigation on the susceptibility of faba bean (*Vicia faba* L.) and sunflower (*Helianthus annus* L.) to iron chlorosis. J. Plant Nutr. 21(7): 1511-1528.
24. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments and photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol. 148: 350-382.
25. Liu, J. and D.C. Shi. 2010. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, inorganic ion and organic acid accumulations of sunflower in responses to salt and salt-alkaline mixed stress. Photosynthetica 48: 127-134.
26. Lucena, J.L. 2000. Effects of bicarbonate nitrate and other environmental factors on iron deficiency chlorosis. J. Plant Nutr. 23: 1591-1606.
27. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edn., Academic Press, London.
28. Mengel, K. 1995. Iron availability in plant tissues: iron chlorosis on calcareous soils. PP. 389-396. In: Abadia, J. (Ed.), Iron Nutrition in Soils and Plants, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
29. Mulholland, B.J., M. Fussell, R.N. Edmondson, A.J. Taylor, J. Basham, J.M.T. McKee and N. Parsons. 2002. The effect of split-root salinity stress on tomato leaf expansion, fruit yield and quality. J. Hort. Sci. Biotech. 77: 509-519.
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. Peiter, E., F. Yan, S. Schubert and F. Yan. 2001. Lime-induced growth depression in lupinus species: Are soil pH and bicarbonate involved. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164: 165-172.
32. Roosta, H.R. and M. Mohsenian. 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in aquaponic system. Sci. Hort. 146: 182-191.
33. 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.
34. Roosta, H.R. and M. Pourebrahimi. 2015. Effects of bicarbonate and different Fe sources on vegetative growth and physiological characteristics of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in hydroponic system. J. Plant Nutr. 38(3): 397-416.
35. Sayed, O.H. 2003. Chlorophyll fluorescence as a tool in cereal crop research. Photosynthetica 41: 321-330.
36. Soltani, A. 2004. Chlorophyll Fluorescence and Its Application. Internal Press, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
37. Stangoulis, J.C.R., B.L. Huynh, R.M. Welch, E.Y. Choi and R.D. Graham. 2007. Quantitative trait loci for phytate in rice grain and their relationship with grain micronutrient content. Euphytica 154: 289-294.
38. Storlie, C.A. and J.R. Heckman. 1996. Bell pepper yield response to carbonated irrigation water. J. Plant Nutr.

19(10-11): 1477-1484.

39. Sultana, N., T. Ikeda and R. Itch. 1999. Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. *Environ. Exp. Bot.* 42: 211-220.
40. Tang, J., C. Zou, Z. He and R. Shi. 2008. Mineral element distributions in milling fractions of Chinese wheats. *J. Cereal Sci.* 48: 821-828.
41. Tewari, A.K. and B.C. Tripathy. 1998. Temperature stress induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat. *Plant Physiol.* 117: 851-858.
42. Turhan, E. and E. Atilla. 2004. Effects of sodium chloride applications and different growth media on ionic composition in strawberry plant. *J. Plant Nutr.* 9: 1653-1665.
43. Vadas, T.M., X. Zhang, A.M. Curran and B.A. Ahner. 2007. Fate of DTPA, EDTA, and EDDS in hydroponic media and effects on plant mineral nutrition. *J. Plant Nutr.* 30: 1229-1246.
44. Valdez-Aguilar, L.A. 2004. Effect of alkalinity in irrigation water on selected greenhouse crops. PhD Dissertation, Texas A & M University.
45. Valdez-Aguilar, L.A. and D.W. Reed. 2008. Influence of potassium substitution by rubidium and sodium on growth, ion accumulation, and ion partitioning in bean under high alkalinity. *J. Plant Nutr.* 31: 867-883.
47. Yang, C.W., A. Jianaer, C.Y. Li, D.C. Shi and D.L. Wang. 2008. Comparison of the effects of salt-stress and alkali-stress on photosynthesis and energy storage of an alkali-resistant halophyte *Chloris virgata*. *Photosynthetica* 46(2): 273-278.
48. Yang, J.Y., W. Zheng, Y. Tian, Y. Wu and D.W. Zhou. 2011. Effects of various mixed salt-alkaline stresses on growth, photosynthesis, and photosynthetic pigment concentrations of *Medicago ruthenica* seedlings. *Photosynthetica* 49: 275-284.
49. Zheng, L., F. Huang and R. Narsai. 2009. Physiological and transcriptome analysis of iron and phosphorus interaction in rice seedlings. *Plant Physiol.* 151: 262-274.
50. Zheng, Y., T. Graham, S. Richard and M. Dixon. 2004. Potted gerbera production in a subirrigation system using low-concentration nutrient solutions. *HortSci.* 39: 1283-1286.
51. Zhu, J.K. 2001. Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci.* 6: 66-71.
52. Zribi, K. and M. Gharsalli. 2002. Effect of bicarbonate on growth and iron nutrition of pea. *J. Plant Nutr.* 25: 2143-2149.
53. Zuo, Y., L. Ren, F. Zhang and R.F. Jiang. 2007. Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in a calcareous soil. *Plant Physiol. Biochem.* 45: 357-364.