# 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[1*]، داراب رضاخانی نژاد[1]، محمود رقامی[1] و مجید اسماعیلی‌زاده[1]

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

## چکیده

**به‌منظور تعیین بهترین منابع آهن برای گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum*, L.) در شرایط قلیایی و غیر قلیایی، آزمایشی به‌صورت 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 در دو سطح (بنانزا و گریفاتون) در سه تکرار در گلخانه‌ی 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)، زایشی (تعداد میوه، طول میوه، وزن میوه، قطر میوه) و اکوفیزیولوژیک ( $F_v/F_m$، PI و RWC) مربوط به تیمار شاهد بود. در رابطه با رنگیزه‌های گیاهی، با افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم، کمترین میزان کلروفیل a، b و کارتنوییدها مربوط به تیمار شاهد و بیشترین مقدار مربوط به تیمار Fe-EDDHA بود. تنش بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه گردید. بر اساس نتایج حاصل، و با توجه به ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار 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

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 شگرفی در عرضه محصولات گلخانه‌ای ایجاد کرده است (۴۹). آهن یکی از عناصر ضروری اما کم‌مصرف و کم‌تحرک 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

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

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

($H^+$) اسیدی و یون‌های هیدروکسید ($OH^-$) بازی است. هنگامی که pH بیش از ۷ است، غلظت $OH^-$ 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 تنش در گیاهان می‌شود. گیاهان به غلظت‌های زیاد بی‌کربنات از طریق کاهش رشد شاخساره واکنش نشان می‌دهند و این ممانعت در رشد شاخساره دربرگیرنده 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 غلظت زیاد از بی‌کربنات دارند، کاهش می‌یابد. در آزمایشی، سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، غلظت $CO_2$ درون‌سلولی، حداکثر بهره‌وری از فتوسیستم دو (PSII) و میزان حداکثر عملکرد کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم II ($F_v/F_m$)، شاخص کارایی فتوسنتزی (PI)، محتوای کلروفیل برگ، وزن تر و ارتفاع گیاه در دانهال‌های 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 میکروارگانیسم‌های خاک ندارد. چرا که آهن آزاد به‌سرعت هیدراته شده و به‌صورت 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 به‌دست آمده است. در آزمایشی، واداس و همکاران (۴۳) به بررسی وضعیت و تأثیر کلات‌های DTPA، EDTA و EDDS (Ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid) بر عناصر غذایی گیاه کاهو در محیط هیدروپونیک پرداختند و ماندگاری (ثبات) این سه نوع کلات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که غلظت EDDS به‌واسطه‌ی بی‌کربنات به‌طور ویژه‌ای در عرض ۷ روز به‌سرعت کاهش یافت. همچنین، مشخص شد که غلظت‌های 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 افتاده باشد. روستا و محسنیان (۳۲) نشان دادند که محلول‌پاشی منابع مختلف آهن ($FeSO_4$، Fe-EDDHA و Fe-DTPA) روی گیاه فلفل سبب افزایش رشد رویشی، عملکرد و رنگ‌گیری بهتر میوه در سیستم آکواپونیک و هیدروپونیک گردید و همچنین باعث افزایش مقدار کلروفیل a، کلروفیل کل، کاروتنوئیدها و قندهای محلول شد. اثر محلول‌پاشی کودهای کلات آهن بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک چهار رقم پسته ایران بررسی شد و مشخص گردید که محلول‌پاشی کلات آهن نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، تعرق و کارایی مصرف آب و کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای شد (۴). در آزمایشی به‌منظور تعیین بهترین منبع آهن تحت شرایط قلیایی از چهار منبع کودی، $FeSO_4$، Fe-EDDHA، Fe-DTPA و Fe-EDTA استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش رشد رویشی (طول ساقه، تعداد برگ، سطح برگ و وزن خشک ریشه) و ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک ($F_v/F_m$، SPAD و RWC) در گیاهان تیمار شده با $FeSO_4$ مشاهده شد. کودهای آهن EDTA و DTPA در حضور ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، مشابه و یا حتی بهتر از EDDHA بودند. اما در غلظت ۱۵ مولار $NaHCO_3$ 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 به‌کارگیری نانوکودها (Nano fertilizers) به‌عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به‌تدریج و به‌صورت 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

کود می‌شود (۷). ترکیبات کلاته آهن بهترین راه‌حل برای برطرف کردن کلروز آهن در همه خاک‌ها و به‌خصوص 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 $۱۱ > pH > ۳$ 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 به‌صورت 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 (بنانزا و گریفاتون) در سه تکرار در گلخانه‌ی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان روی گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum* 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 بسترهای 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 میکروموس بر سانتی‌متر، موجود در گلخانه دانشکده تأمین شد. در طول مدت اعمال تیمارها شرایط دمایی گلخانه ۳±۲۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۳/۲-۵۲/۴ درصد ثبت گردید. عناصر پرمصرف مورد استفاده در محلول غذایی بر 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 $KNO_3$، ۲/۵ میلی‌مولار $Ca(NO_3)_2.4H_2O$، ۱ میلی‌مولار $MgSO_4.7H_2O$، ۲/۸۶ میلی‌گرم در لیتر $H_3BO_3$، ۱/۸۱ میلی‌گرم در لیتر $MnCl_2.4H_2O$، ۰/۲۲ میلی‌گرم در لیتر $ZnSO_4.5H_2O$، ۰/۰۸ میلی‌گرم در لیتر $CuSO_4.5H_2O$ و ۰/۰۲ میلی‌گرم در لیتر $H_2MoO_4.H_2O$ 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 دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. طول و قطر میوه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد.

### ویژگی‌های 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 ویژگی $F_v/F_m$ ثبت می‌کند. روش کار

بدین‌صورت 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 ۰/۲۵گرم برگ تازه خرد و در یک هاون چینی سرد با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ سائیده شد تا به‌صورت 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 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 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 پتری‌دیش 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:

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

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 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 شد. سپس، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال، به هر نمونه اضافه گردید و در نهایت توسط آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. این عصاره به‌طور 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 فلیم فتومتر، فسفر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، نیتروژن توسط دستگاه کجلدال 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 صرف‌نظر از نوع منبع آهن به‌کار رفته، افزایش غلظت بی‌کربنات سدیم به‌طور 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 شاخساره واکنش نشان می‌دهند و این ممانعت در رشد شاخساره دربرگیرنده کاهش در تعداد برگ‌ها،

**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 | میانگین مربعات | | |
|---|---|---|---|---|
| | | وزن خشک اندام هوایی | وزن خشک ریشه | سطح برگ |
| رقم (C) | ۱ | ۳۱۱/۹۹۳$^{**}$ | ۱۲/۸۶$^{**}$ | ۴۵۲/۵۵$^{*}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۱۵۲/۹۸۲$^{**}$ | ۱۰۲/۷۵$^{**}$ | ۴۱/۱۰$^{ns}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۳۸۹/۲۷۲$^{**}$ | ۵۵۳/۸۱$^{**}$ | ۲۲۳۰/۶۷$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۲۸/۲۶۹$^{*}$ | ۲۹/۸۵$^{**}$ | ۱۳۱/۲۶$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۴۰/۹۶۰$^{*}$ | ۰/۶۳$^{ns}$ | ۲۴۲/۲۱$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۳۵/۰۷۳۲$^{*}$ | ۷۵/۰۲$^{**}$ | ۲۳۶/۶۲۱$^{ns}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۷/۹۶۵$^{ns}$ | ۲۱/۱۳$^{**}$ | ۲۰۴/۸۹۲$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۶/۷۷ | ۳/۲۰۱ | ۷۰/۸۸ |
| ضریب تغییرات | | ۱۱/۷۶ | ۱۲/۶۹ | ۱۰/۵۲۱ |

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

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

| بی‌کربنات سدیم (mM) | منبع آهن | رقم | وزن تر ریشه (گرم در هر گیاه) | وزن خشک ریشه (گرم در هر گیاه) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | شاهد | بنانزا | ۴۴/۹۲dc | ۱۲/۶۳de |
| | Fe-EDDHA | بنانزا | ۷۸/۵۷a | ۲۵/۵۴a |
| | نانوکلات آهن | بنانزا | ۵۷/۱۱b | ۱۴/۴۸c |
| | شاهد | گریفاتون | ۴۷/۱۶c | ۱۲/۹۹dc |
| | Fe-EDDHA | گریفاتون | ۶۰/۲b | ۲۱/۱b |
| | نانوکلات آهن | گریفاتون | ۶۲/۴۲b | ۲۱/۳۶b |
| ۱۰ | شاهد | بنانزا | ۲۸/۰۱f | ۸/۹۳e |
| | Fe-EDDHA | بنانزا | ۳۶/۲۲def | ۸/۹۷e |
| | نانوکلات آهن | بنانزا | 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 معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

وزن تر و خشک و طول ساقه خواهد بود. رشد کاهش یافته شاخساره، به میزان فتوسنتز کمتر درنتیجه زردی ایجاد شده به‌وسیله بی‌کربنات در برگ‌ها مربوط می‌شود. میزان فتوسنتز کمتر، ناشی از تخریب سنتز کلروفیل به دلیل انتقال کم آهن یا قابلیت حل‌پذیری کمتر آهن در خاک یا محلول محیط کشت می‌شود. در تحقیقی که توسط پیوندی و همکاران (۲) به‌منظور

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

| بی‌کربنات سدیم (mM) | منبع آهن | وزن تر اندام هوایی (گرم در هر گیاه) | وزن خشک اندام هوایی (گرم در هر گیاه) |
|---|---|---|---|
| ۰ | شاهد | ۱۰۸/۰۷d | ۱۹/۴۸c |
| | Fe-EDDHA | ۱۷۷/۵۹a | ۳۲/۷۴a |
| | نانوکلات آهن | ۱۳۴/۲۴b | ۲۴/۰۱b |
| ۱۰ | شاهد | ۸۷/۵۳e | ۱۴/۱۵d |
| | Fe-EDDHA | ۱۱۸/۸c | ۲۲/۳cb |
| | نانوکلات آهن | ۱۰۵/۴d | ۲۰/۰۵c |

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

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 Fe-EDDHA است (۸و ۳۴). کاهش سطح برگ گیاه به این دلیل است که سلول‌های برگ در شرایط تنش به حداکثر 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 ازجمله 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 ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار بود. سطح برگ گیاه فلفل تحت تأثیر بی‌کربنات سدیم کاهش یافت و رقم بنانزا 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 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 بنانزا 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 (۹و ۲۳) 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 مقادیر 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

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

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

** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

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

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

در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری 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**

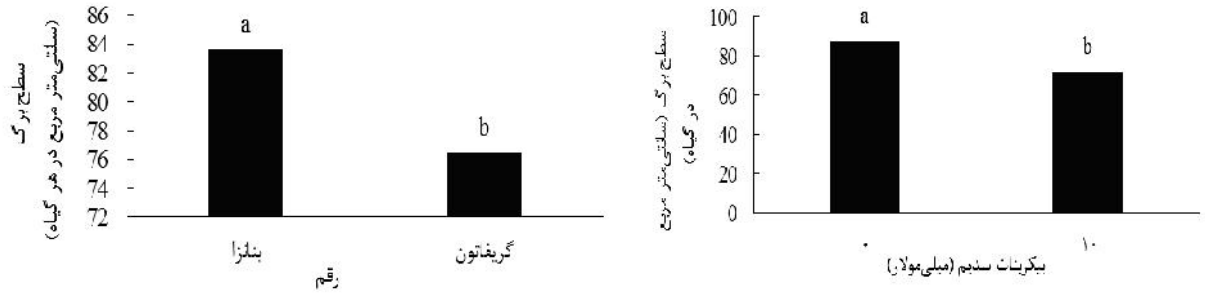
| بی‌کربنات سدیم (mM) | تعداد میوه | وزن میوه (گرم) | طول میوه (سانتی‌متر) | قطر میوه (سانتی‌متر) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | a۶/۴۴ | a۱۰۸/۸۷ | a۴۶/۶۳ | a۴۴/۲۵ |
| ۱۰ | b۵/۲۷ | b۱۰۰/۱۶ | b۳۶/۲۵ | b۴۰/۷۶ |

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

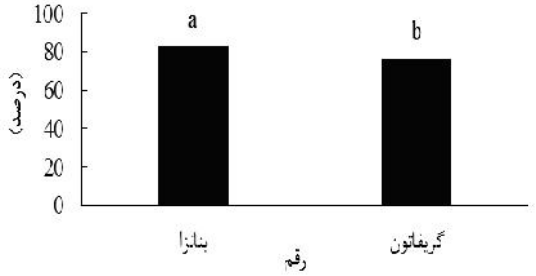
**جدول ۷. مقایسه میانگین اثر نوع کود آهن بر قطر و طول میوه فلفل**

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

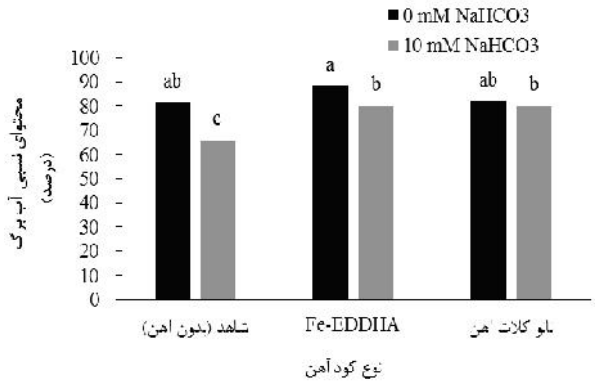
در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند




**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 ۲. اثر رقم بر محتوای نسبی آب 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**

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 میلی‌مولار 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 بنانزا بیشتر از رقم گریفاتون است. همچنین، با توجه به شکل ۳، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در تیمار شاهد و Fe-EDDHA میزان محتوای نسبی آب برگ کاهش معنی‌داری نسبت به غلظت صفر میلی‌مولار 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 به‌طور مستقیم سبب کلروز ناشی از

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

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RWC | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | کارتنوئیدها |
| رقم (C) | ۱ | ۳۸۷/۶۹$^{**}$ | ۰/۰۰۱۰۵$^{**}$ | ۰/۰۰۱۳۶$^{**}$ | ۰/۰۰۰۰۷۴۲$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۴۳$^{**}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۳۴۱/۶۴$^{**}$ | ۰/۰۰۲۹۴$^{××}$ | ۰/۰۰۱۵۹$^{**}$ | ۰/۰۱۸۲$^{**}$ | ۰/۰۰۱۶$^{**}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۶۷۸/۳۲$^{**}$ | ۰۰/۰۰۰۲۶۴$^{*}$ | ۰/۰۰۰۲۶۳$^{**}$ | ۰/۰۰۰۸۹۷$^{**}$ | ۰/۰۰۰۲۴$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۱۱۳/۱۶$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۹۱۴$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۱۱۳$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۱۰۳$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۵۴$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۱۱/۳۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۱۳۹$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۸۸۵$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۳۲۶$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۷۶$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۱۴۱/۵۳۰$^{*}$ | ۰/۰۰۰۱۲۹ $^{*}$ | ۰/۰۰۰۱۴۴$^{**}$ | ۰/۰۰۰۶۶۶$^{**}$ | ۰/۰۰۰۱۰۱$^{*}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۲۶/۱۲$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۳۰۹$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۲۲۳$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۵۱۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۰۲۴۸$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۳۷/۶۱ | ۰/۰۰۰۰۳۵۴ | ۰/۰۰۰۰۱۳۱ | ۰/۰۰۰۱۱۲ | ۰/۰۰۰۰۱۹۳ |
| ضریب تغییرات | | ۷/۵۰ | ۱۳/۱۹ | ۱۰/۵۵ | ۱۱/۴۲ | ۱۴/۷۴ |

**، * و ns به‌ترتیب 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 | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $F_v/F_m$ (برگ‌های جوان) | $F_v/F_m$ (برگ‌های پیر) | PI (برگ‌های جوان) | PI (برگ‌های پیر) |
| رقم (C) | ۱ | ۰/۰۰۰۱$^{ns}$ | ۰/۰۰۶۴۰$^{*}$ | ۰/۳۲$^{ns}$ | ۰/۰۲$^{ns}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۰/۸۸۶$^{**}$ | ۰/۰۰۶۰۶$^{ns}$ | ۹/۱۸$^{**}$ | ۰/۰۴$^{ns}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۰/۱۳۸$^{**}$ | ۰/۰۱۱۳$^{**}$ | ۳/۳۹$^{ns}$ | ۱/۳۸$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۰/۰۰۵۹$^{ns}$ | ۰/۰۰۸۶۰$^{ns}$ | ۰/۱۵$^{ns}$ | ۰/۱۳$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۰/۰۰۷۸$^{ns}$ | ۰/۰۰۱۱۱$^{ns}$ | ۰/۰۱$^{ns}$ | ۰/۰۸$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۰/۰۱۶۱$^{*}$ | ۰/۰۰۴۳۵$^{ns}$ | ۰/۵۳$^{*}$ | ۰/۱۸$^{ns}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۰/۰۰۲۸۵$^{ns}$ | ۰/۰۰۴۳۵$^{ns}$ | ۰/۲۱$^{ns}$ | ۰/۱۵$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۰/۴۲۲ | ۰/۰۰۱۳۳ | ۰/۱۳ | ۰/۰۶ |
| ضریب تغییرات | | ۱۰/۵۱ | ۵/۱۰ | ۱۴/۹۰ | ۱۲/۳۳ |

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

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 شوری کاهش یافت.

## 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 کارتنوئیدهای 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 کارتنوئیدها در

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

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

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 فتوسنتزی برگ فلفل**

| رقم | کلروفیل a (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر) | کلروفیل b ( میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر) | کارتنوئیدها (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر) |
|---|---|---|---|
| بنانزا | ۰/۰۴۸a | ۰/۰۴a | ۰/۰۳۳a |
| گریفاتون | ۰/۰۳۹b | ۰/۰۲b | ۰/۰۲۶b |

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

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). کارتنوئیدها گروهی از مولکول‌های بزرگ ایزوپرونوئیدی هستند که نقش مهم و ضروری در فتوسنتز و محافظت نوری دارند و به هیدروکربن‌های کاروتن مانند لیکوپن، بتاکاروتن یا گزانتوفیل‌ها تقسیم می‌شوند. دو عمل مهم کارتنوئیدها عبارت است از: محافظت کلروفیل در برابر اکسیداسیون نوری و جذب و انتقال انرژی فوتون‌هایی با طول‌موج کوتاه به کلروفیل a (۱۶). گزارش شده که کاهش مقدار کارتنوئیدها در شرایط تنش نیز به علت تجزیه بتاکاروتن و تشکیل زآزاتین در چرخه گزانتوفیل است (۳۹). محققین گزارش دادند که در تنش‌های شدید طولانی‌مدت، سنتز آنزیم پروفوبیلینوژن دی آمیناز افزایش می‌یابد. این آنزیم نقش کلیدی در سنتز تتراپیرول‌ها دارد که پیش‌ماده ساخت کلروفیل‌ها و پورفیبرین‌ها است (۴۱). در مورد کارتنوئیدها در غلظت ۱۰ میلی‌مولار، تیمار شاهد (بدون آهن) کمترین میزان را داشت و اختلاف معنی‌داری با بقیه تیمارها داشت. با توجه به جدول ۱۲، در برگ‌های جوان و در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در تیمار شاهد و تیمار آهن نانو کاهش معنی‌داری در نسبت کلروفیل فلورسانس متغیر به حداکثر، نسبت به غلظت صفر میلی‌مولار رخ داد. ولی در تیمار Fe-EDDHA کاهش معنی‌داری در کلروفیل فلورسانس متغیر به حداکثر مشاهده نشد. بیشترین مقدار کلروفیل فلورسانس متغیر به حداکثر مربوط به رقم بنانزا بود و در برگ‌های پیر در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری در شاخص مذکور نسبت به غلظت صفر میلی‌مولار 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

**جدول ۱۲. مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم و نوع کود آهن بر ویژگی‌های فتوسنتزی برگ جوان فلفل**

| سطح بی‌کربنات سدیم (mM) | منبع آهن | $F_v/F_m$ (برگ‌های جوان) | PI (برگ‌های جوان) |
|---|---|---|---|
| ۰ | شاهد | ۰/۴۲d | ۲/۱۱c |
| | Fe-EDDHA | ۰/۸۸a | ۳/۶۲a |
| | نانوکلات آهن | ۰/۷۳b | ۲/۵۸b |
| ۱۰ | شاهد | ۰/۲۱e | ۱/۶۳d |
| | Fe-EDDHA | ۰/۸۱a | ۳/۳۴a |
| | نانوکلات آهن | ۰/۶۳c | ۱/۵d |

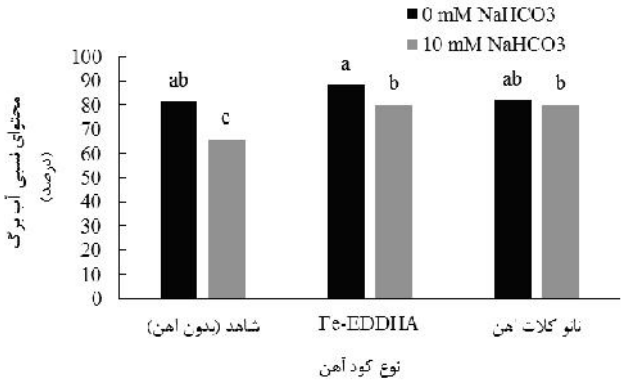
در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند

**جدول ۱۳. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تنش بی‌کربنات سدیم بر ویژگی‌های فتوسنتزی برگ پیر فلفل**

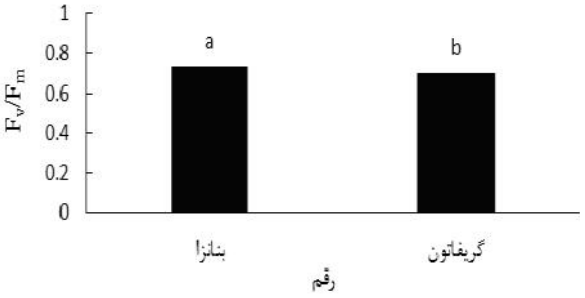
| سطح بی‌کربنات سدیم(mM) | $F_v/F_m$ (برگ‌های پیر) | PI (برگ‌های پیر) |
|---|---|---|
| ۰ | ۰/۷۳a | ۲/۲۴a |
| ۱۰ | ۰/۶۹b | ۱/۸۵b |

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

نتایج این پژوهش، میزان کلروفیل گوجه‌فرنگی (۳۲) و ذرت (۱۵) نیز تحت تیمار بی‌کربنات 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 فتوسنتز است که به‌طور گسترده‌ای در پژوهش‌های فتوسنتز به‌کار گرفته می‌شود. همچنین، از کلروفیل فلورسانس برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و میزان آسیب وارده به دستگاه فتوسنتزی استفاده می‌شود (۱۷). نسبت $F_v/F_m$ حداکثر کارایی کوانتومی 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). تنش‌ها علاوه بر آسیب مستقیم بر دستگاه فتوسنتزی، باعث خسارت به سیستم انتقال الکترون و فعالیت آنزیم روبیسکو می‌شوند (۳۵). تجزیه و تحلیل تغییرات کلروفیل فلورسانس یکی از راه‌های شناسایی بخش‌های آسیب‌دیده دستگاه فتوسنتزی 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 در $F_v/F_m$ 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 فتوسنتزی 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 بی‌کربنات سدیم و منابع آهن بر $F_v/F_m$ برگ‌های جوان معنی‌دار بود. در مقایسه با شاهد بی‌کربنات 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




**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**




**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**

این موضوع را می‌توان به کارایی زیاد کود Fe-EDDHA در شرایط قلیایی دانست، به‌طوری‌که 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 به‌طور مستقیم در چرخه فتوسنتز گیاه دخالت دارد و تولید مواد غذایی هم با افزایش بازده فتوسنتز در ارتباط است. اگرچه تولید مواد غذایی به فاکتورهای دیگری هم بستگی دارد، اما اگر فتوسنتز گیاه افزایش پیدا کند تولید مواد غذایی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. میزان $F_v/F_m$ در برگ‌های پیر رقم بنانزا بیشتر از رقم گریفاتون بود (شکل ۴).

## شاخص کارایی دستگاه فتوسنتزی (PI)

نتایج به‌دست‌آمده در مورد فلفل تحت تنش قلیائیت نشان داد که تیمار بی‌کربنات سدیم در مقایسه با شاهد، میزان شاخص کارایی فتوسنتزی (Performance Index) را در تمام تیمارها به میزان قابل‌توجهی 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 فتوسنتزی به‌تدریج با افزایش تنش شوری- قلیائیت کاهش یافت، به‌طوری که تحت تنش شوری- قلیائیت شدید، میزان شاخص کارایی فتوسنتزی در مقایسه با شاهد کاهش قابل‌توجهی داشت. آن‌ها همچنین بیان کردند که محدودیت غیر روزنه‌ای، یعنی کاهش فعالیت فتوسنتز در فتوسیستم II، نقش مهمی در کاهش میزان فتوسنتز در تنش شوری- قلیائیت زیاد بازی می‌کند. از عوامل غیر روزنه‌ای مؤثر بر فتوسنتز می‌توان پتانسیل آب برگ، ترکیبات بیوشیمیایی (۳۶)، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (۴۶) و تجمع یون‌های سمی در سیتوسول (۲۰) را نام برد. با استناد به نتایج این پژوهشگران، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تیمارهای بی‌کربنات سدیم ممکن است بخشی از دلیل کاهش شاخص کارایی فتوسنتزی 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

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

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | کلسیم | پتاسیم | فسفر | نیتروژن |
| رقم (C) | ۱ | ۰/۰۷۳۸$^{ns}$ | ۴۱/۹۹۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۲۷۶$^{ns}$ | ۰/۰۹۱۳$^{ns}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۴/۳۵۱$^{**}$ | ۵۰۳/۱۰۰ $^{ns}$ | ۰/۰۰۳۸۹$^{ns}$ | ۱۱/۱۱۷$^{**}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۴/۷۳۰$^{ns}$ | ۴۲۷/۹۳۸ $^{ns}$ | ۰/۱۲۳$^{**}$ | ۸/۸۷۱$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۰/۰۴۴۸$^{ns}$ | ۱۷۱/۵۳۴$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۰۵۱۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۱۶۵$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۰/۱۳۰$^{ns}$ | ۷/۵۰۷$^{ns}$ | ۰/۰۰۴۵۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۱۳۰$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۰/۱۱۳$^{**}$ | ۱۱/۳۰۱$^{ns}$ | ۰/۰۰۱۶۴$^{ns}$ | ۰/۰۶۹۳$^{ns}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۰/۰۱۱۳$^{ns}$ | ۳۹/۱۸۲$^{ns}$ | ۰/۰۰۷۳۸$^{ns}$ | ۰/۰۰۸۴۷$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۰/۰۳۲۳ | ۱۵۵/۷۴۱ | ۰/۰۰۳۴۳ | ۰/۰۵۲۲ |
| ضریب تغییرات | | ۹/۶۳ | ۶/۳۵ | ۱۳/۱۷ | ۸/۲۱ |

** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

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

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | کلسیم | پتاسیم | فسفر | نیتروژن |
| رقم (C) | ۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۵$^{ns}$ | ۵۳۷/۷۷$^{**}$ | ۰/۰۰۴۸۳$^{ns}$ | ۰/۰۴۸۶$^{ns}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۰/۵۷$^{**}$ | ۶۶/۲۶$^{ns}$ | ۰/۰۴۹۰$^{**}$ | ۱۲/۴۵۱$^{**}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۰/۳۶$^{**}$ | ۳۵۳۹۲/۸۹$^{**}$ | ۰/۲۱۰$^{**}$ | ۱۱/۳۱۳$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۰/۰۰۱$^{ns}$ | ۴۰/۱۷۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۲۹۴$^{ns}$ | ۰/۰۰۳۵۵$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۰/۰۰۳۶$^{ns}$ | ۴۴۵/۰۶$^{**}$ | ۰/۰۰۱۰۸$^{ns}$ | ۰/۰۰۲۰۷$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۰/۰۰۲۶$^{*}$ | ۹۳/۸۵$^{ns}$ | ۰/۰۲۱۷$^{*}$ | ۰/۱۹۶$^{*}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۰/۰۰۰۲۰۴$^{ns}$ | ۵۶/۱۸$^{ns}$ | ۰/۰۰۲۲۷$^{ns}$ | ۰/۰۲۰۰$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۰/۰۰۰۵۹ | ۳۳/۹۳ | ۰/۰۰۰۷۰ | ۰/۰۴۸۷ |
| ضریب تغییرات | | ۷/۶۲ | ۱۱/۸۷ | ۶/۲۱ | ۶/۶۱ |

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

آهن بر غلظت آهن، منگنز، روی و مس در برگ و ریشه فلفل در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. کمترین مقدار نیتروژن در تیمار شاهد (بدون آهن) مشاهده شد (جدول ۱۸). نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۹) نشان داد اختلاف معنی‌داری بین کلات‌های آهن نانو و Fe-EDDHA وجود نداشت و کمترین نیتروژن برگ در تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین، غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار میزان نیتروژن برگ نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم شد (جدول ۲۰). در ریشه نیز در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم، در تمام تیمارهای کودی، مقدار نیتروژن نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات سدیم کاهش پیدا کرد. در مورد عنصر فسفر، غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار میزان

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

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | روی | مس | آهن | منگنز |
| رقم (C) | ۱ | ۵۸/۲۶$^{ns}$ | ۰/۰۹۰۰$^{ns}$ | ۲۴۸/۵۸$^{ns}$ | ۴۰/۱۱۱$^{ns}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۱۷۴۱/۵۶$^{**}$ | ۰/۲۰۵$^{ns}$ | ۱۰۵۹۴/۴۶$^{**}$ | ۱۵۶۸/۲۲۵$^{**}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۱۴۹۷/۶۹$^{**}$ | ۹۴/۷۳۷$^{**}$ | ۸۵۹۳/۲۹$^{**}$ | ۱۶۱۳/۳۶۱$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۳۹/۹۷$^{ns}$ | ۰/۱۵۷$^{ns}$ | ۱۲۶/۹۹$^{ns}$ | ۱۳/۱۶۱$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۱۷/۶۴$^{ns}$ | ۰/۰۹۰۰$^{ns}$ | ۸۵/۲۵$^{ns}$ | ۰/۱۶۰$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۳۶/۴۴ $^{ns}$ | ۰/۲۰۱$^{ns}$ | ۲۳۲/۰۴$^{*}$ | ۱۹۴/۴۳۸$^{**}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۱۲/۵۰$^{ns}$ | ۰/۰۷۵۸$^{ns}$ | ۴۳/۱۳$^{ns}$ | ۹/۲۲۷$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۲۲۰/۸۰۱ | ۰/۰۶۱۶ | ۶۵/۳۸ | ۲۱/۳۲ |
| ضریب تغییرات | | ۸/۰۰۰۷ | ۳/۳۵ | ۱۲/۴۶ | ۱۱/۳۳ |

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

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

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | روی | مس | آهن | منگنز |
| رقم (C) | ۱ | ۲۶/۲۴$^{ns}$ | ۱/۷۷۷$^{ns}$ | ۱۱۸/۴۴$^{ns}$ | ۲۷/۹۱۳$^{ns}$ |
| کود آهن (F) | ۲ | ۱۷۱۳/۹۰$^{**}$ | ۵۸/۲۰۷$^{**}$ | ۲۸۴۶۲/۴۸$^{**}$ | ۶۴۳/۳۰۰$^{**}$ |
| بی‌کربنات (B) | ۱ | ۱۵۶۲/۸۸$^{**}$ | ۵۳/۷۷۷$^{**}$ | ۵۴۹۸/۲۲$^{**}$ | ۲۶۰۹/۵۰۶$^{**}$ |
| (C ×F) | ۲ | ۴۹/۱۱$^{ns}$ | ۰/۴۸۰$^{ns}$ | ۱۶۷/۳۷$^{ns}$ | ۵۰/۷۱۸$^{ns}$ |
| (C ×B) | ۱ | ۱۱/۳۳$^{ns}$ | ۰/۱۱۱$^{ns}$ | ۱۶/۹۴$^{ns}$ | ۱۴۲/۸۰۲$^{ns}$ |
| (B ×F) | ۲ | ۳۷/۴۶ $^{ns}$ | ۰/۱۰۰$^{ns}$ | ۷۴/۷۰$^{ns}$ | ۱۳۳/۸۴۵$^{ns}$ |
| (C ×F ×B) | ۲ | ۸/۱۱$^{ns}$ | ۰/۵۳۸$^{ns}$ | ۱۱/۵۵$^{ns}$ | ۱۰۹/۲۵۵$^{ns}$ |
| خطا | ۲۴ | ۱۹/۲۶۱ | ۰/۹۰۴ | ۶۷/۹۱ | ۴۷/۹۷۰ |
| ضریب تغییرات | | ۷/۱۵ | ۹/۹۰۴ | ۹/۱۹ | ۱۰/۴۳۶ |

** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۱٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

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 معنی‌داری در میزان فسفر نسبت به غلظت صفر بی‌کربنات رخ داد، و این کاهش در تیمار شاهد بیشتر بود.

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

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

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

**جدول ۱۹. مقایسه میانگین برهمکنش 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 بی‌کربنات سدیم (mM) | منبع آهن | کلسیم (درصد وزن خشک) | | فسفر (درصد وزن شک) | نیتروژن (درصد وزن شک) | آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | اندام هوایی | ریشه | ریشه | ریشه | برگ | برگ |
| ۰ | شاهد | ۰/۱۴c | ۰/۲۵c | ۰/۴۷b | ۲/۵۷c | ۴۳/۳۱e | ۵۴/۲۶a |
| | Fe-EDDHA | ۰/۲۶a | ۰/۴۰a | ۰/۵۱a | ۴/۵۹a | ۱۵۹/۵۸a | ۳۹/۴۶b |
| | نانوکلات آهن | ۰/۲۵a | ۰/۳۹a | ۰/۵a | ۴/۵۲a | ۱۲۸/۰۳b | ۴۳/۷۶b |
| ۱۰ | شاهد | ۰/۰۹d | ۰/۲۲d | ۰/۲۲d | ۷۸/۱d | ۱۷/۲۱f | ۵۰/۱۱a |
| | Fe-EDDHA | ۰/۱۷b | ۰/۳۲b | ۰/۴۲c | ۳/۳۳b | ۱۰۹/۲۱c | ۲۲/۳۵c |
| | نانوکلات آهن | ۰/۱۸b | ۰/۳۱b | ۰/۳۹c | ۳/۲۵b | ۹۸/۶۸d | ۲۴/۸۶c |

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

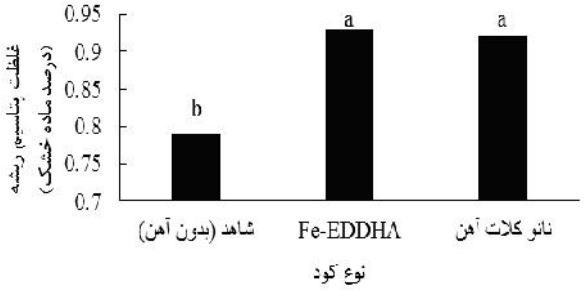
**جدول ۲۰. مقایسه میانگین اثر سطوح بی‌کربنات سدیم بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، آهن و روی، مس، منگنز در اندام هوایی و ریشه فلفل**

| سطح بی‌کربنات سدیم (mM) | فسفر (درصد وزن خشک) | نیتروژن (درصد وزن خشک) | روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | اندام هوایی | اندام هوایی | اندام هوایی | ریشه | اندام هوایی | ریشه | ریشه | ریشه |
| ۰ | ۰/۵[a] | ۳/۲۸a | ۵۷/۶۷a | ۶۷/۳۹a | ۸/۸۲a | ۱۰/۸۲a | ۱۰۱/۹a | ۷۴/۸۷a |
| ۱۰ | ۰/۳۸[b] | ۲/۲۸b | ۴۴/۷۷b | ۵۴/۷۷b | ۸/۳۷b | ۸/۳۷b | ۷۷/۲b | ۵۷/۸۵b |

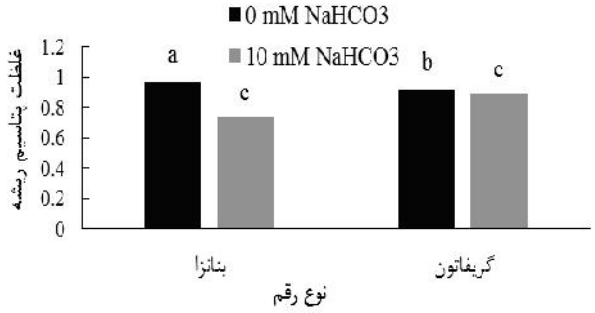
در هر ستون، اعدادی که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

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

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




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




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

تیمارهای Fe-EDDHA و نانوکود آهن مشاهده نشد (جدول ۱۹). در خصوص میزان کلسیم ریشه، نتایج بدین‌صورت بود که در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم در همه‌ی تیمارهای کودی کاهش معنی‌داری 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 معنی‌داری 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 معنی‌داری مشاهده نشد. طبق جدول ۲۰، غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم باعث کاهش معنی‌دار 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 معنی‌داری داشت. اما در تیمار شاهد (بدون آهن) تفاوت معنی‌داری 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 آهن نانو و Fe-EDDHA اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۱۹). همچنین، در غلظت ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم کاهش معنی‌داری 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 معنی‌داری 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 معنی‌داری 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 معنی‌داری نشان داد، و کمترین میزان آهن مربوط به تیمار شاهد بود و بین تیمارها نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری 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

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 ۵/۸ تا ۶/۴ است. در این پژوهش، بی‌کربنات سدیم بر جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف تأثیرگذار بود. احیاء $Fe^{3+}$ ممکن است توسط pH زیاد آپوپلاست متوقف شود و انتقال آهن به اندام هوایی متوقف گردد (۲۸و۵۰). بی‌کربنات از طریق افزایش pH شیره سلولی در درون آوندها در نهایت سبب رسوب و غیرفعال شدن برخی از عناصر غذایی نظیر 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 کم‌محلول 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 به‌صورت 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 آنتاگونیستی دارند. به‌عبارت دیگر، افزایش میزان سدیم باعث کاهش میزان پتاسیم می‌شود (۱۹).

با افزایش pH، مقدار مس قابل‌جذب در خاک کم می‌شود و همچنین تشکیل ترکیبات غیرمحلول 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 آنتاگونیستی 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 (۵و 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 فتوسنتز 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 (۲۶و ۳۳). در ریشه، غلظت آهن نسبت به برگ خیلی بیشتر بود. افزایش میزان آهن در ریشه نسبت به برگ ممکن است به علت تجمع این عنصر در آپوپلاست 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 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 (۱۰). با توجه به نتایج به دست آمده، Fe-EDDHA به دلیل حلالیت 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.

## نتیجه‌گیری

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 میلی‌مولار بی‌کربنات سدیم سبب کاهش جذب عناصر غذایی توسط گیاه شد. در این آزمایش، در غلظت بالای بی‌کربنات سدیم (۱۰ میلی‌مولار) با استفاده از منابع کودی Fe-EDDHA و آهن نانو، نتایج کاملاً رضایت بخشی 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 باغبانی دانشگاه ولی‌عصر(عج)رفسنجان به‌خاطر استفاده از گلخانه‌ی هیدروپونیک برای انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## 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 خضرا 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. روستا، ح. ر. و ع. ر. سجادی‌نیا. ۱۳۸۸. اثرهای محلول‌پاشی نوعی کود کلات آهن بر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی چهار رقم پسته تجاری ایران. مجله علوم فنون باغبانی ایران ۱۰: ۲۶۳-۲۷۴.

۵. علی پور، 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. Rellan-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 cartenoids: 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 annum* 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. Temprature 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.