پاسخ پایه‌های 'به' (*Cydonia oblonga* Mill.)، گلابی و زالزالک به کمبود آهن در کشت بدون خاک

سیمین محمدی[۱]، بهرام بانی‌نسب[۱*]، امیرحسین خوشگفتارمنش[۲] و ایوبعلی قاسمی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۵)

چکیده

زردبرگی (کلروز) آهن یکی از مهم‌ترین مشکلات تغذیه‌ای درختان 'به' می‌باشد. ولی بین پایه‌های مختلف 'به' از نظر تحمل به کمبود آهن در خاک‌های آهکی اختلاف وجود دارد. در این راستا، تحمل پایه‌های بذری 'به'، گلابی و زالزالک و پایه رویشی کوئینس آ به کمبود آهن در دو سطح آهن (۳ و ۵۰ میکرومولار)، در حضور یا عدم حضور ۱۰ میلی‌مولار بی‌کربنات، در کشت بدون خاک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این پژوهش، پایه‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی به تنش کمبود آهن داشتند. پایه‌های گلابی و زالزالک کمترین شدت زردبرگی را در بین پایه‌های مورد مطالعه در شرایط تنش کمبود آهن نشان دادند و دارای بیشترین ارتفاع، تعداد برگ و غلظت آهن برگ و ریشه بودند. فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز نیز در این پایه‌ها، در شرایط کمبود آهن، کمتر کاهش یافت. در حالی که در پایه بذری 'به'، زردبرگی شدید همراه با کاهش فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز (۷۴/۱۹- درصد) و آسکوربات پراکسیداز (۵۲/۳۵- درصد) مشاهده شد. پایه کوئینس آ نسبت به پایه بذری 'به' تحمل بیشتری در برابر کمبود آهن نشان داد. نتایج همچنین نشان داد که حضور بی‌کربنات موجب ایجاد نشانه‌های کمبود آهن در گیاه، حتی با وجود غلظت کافی آهن در محیط کشت (۵۰ میکرومولار) شد. در مجموع، نتایج بیانگر تحمل بیشتر پایه‌های گلابی و زالزالک به شرایط تنش کمبود آهن بود.

واژه‌های کلیدی: تنش کمبود آهن، کلروز، پایه بذری، پایه رویشی، بی‌کربنات، خاک آهکی

مقدمه

آهن از جمله عناصر کم‌مصرف مؤثر در رشد و نمو گیاه است (۲۱). حدود ۸۵٪ از آهن برگ در کلروپلاست‌ها قرار دارد (۳). بنابراین، در شرایط کمبود آهن، کاهش غلظت آهن برگ با کاهش غلظت کلروفیل همراه است (۱۷ و ۲۸). کمبود این عنصر در درختان میوه سبب کاهش سنتز کلروفیل و سطح برگ و همچنین کاهش عملکرد و اندازه و کیفیت میوه می‌شود (۱). مولاسیوتیس و همکاران (۲۳) گزارش نمودند که در پایه‌های هلو، در شرایط کمبود آهن، رادیکال-های آزاد اکسیژن تجمع می‌یابند. یکی از سیستم‌های دفاعی گیاهان در مقابل این رادیکال‌ها تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپراکسید دسموتاز، کاتالاز و ایزوفرم‌های پراکسیداز می‌باشد که در ساختار آنها عنصر آهن وجود دارد. بنابراین، در شرایط کمبود آهن، فعالیت هردو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز کاهش می‌یابد (۲۲). همچنین، از جمله خسارت‌های اکسیداتیو، تحت شرایط کمبود آهن، آسیب به غشای سلولی است که با افزایش حساسیت رقم به کمبود آهن، نشت یونی غشا نیز افزایش می‌یابد (۱۹).

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: bbanin@cc.iut.ac.ir

بین ۲۵-۴۵ درصد اراضی کشاورزی در سطح جهان و بیش از ۸۰٪ اراضی کشاورزی در ایران، آهکی می‌باشد (۲). در این خاک‌ها، مقادیر قابل توجهی از بی‌کربنات‌ها و کربنات‌ها وجود دارند که میزان آنها گاهی به بیش از ۴۰٪ می‌رسد. وجود این ترکیبات در خاک‌ها (که پ- هاش آنها بین ۷/۵ تا ۸/۵ است) معمولاً باعث ایجاد مشکلاتی نظیرکمبود عناصر غذایی کم‌مصرف، مانند آهن، می‌شود (۱). عوامل متعددی در ایجاد زردبرگی آهن در گیاهان نقش دارند که در این بین پ- هاش خاک و غلظت یون بی‌کربنات بیش از سایر عوامل می‌توانند در ایجاد زردبرگی نقش داشته باشند (۲). محققین متعددی تأثیر بی‌کربنات بر بروز زردبرگی آهن در هلو (۸ و ۳۰)، انگور (۱۹)، گلابی (۱۵ و ۲۴) و 'به' (۱۱ ،۱۴و ۳۳) را مورد بررسی قرار داده‌اند. دونینی و همکاران (۱۵) گزارش کردند که پایه گلابی در شرایط کمبود آهن ناشی از حضور بی‌کربنات در محلول غذایی، نسبت به پایه‌های 'به'، تحمل بیشتری به زردبرگی آهن دارد. در این شرایط، ریشه گلابی با افزایش فعالیت آنزیم فریک- کلات ریدوکتاز و پمپ پروتون، که از جمله مکانیسم‌های مهم گیاهان دارای راهکار اول (دولپه‌ای‌ها) می‌باشد، سبب کارآیی جذب بیشتر آهن در این پایه شد.

درخت 'به' از گروه درختان میوه دانه‌دار است که نسبت به سایر درختان میوه معتدله، درختی کم توقع است (۴). 'به' همچنین یکی از متداول‌ترین پایه‌های مورد استفاده برای گلابی است. ولی حساسیت زیاد آن به آهک باعث گسترش مشکلات زردبرگی برای ارقام گلابی پیوندی روی آن می‌شود (۱۱، ۱۴ و۳۲).

زالزالک (*Crataegus* sp.) نیز به علت سازگاری با خاک‌های آهکی و تحمل نسبی به خشکی به عنوان پایه برای گلابی و 'به' مورد استفاده قرار می‌گیرد (۴).

جلوگیری از بروز زردبرگی ناشی از کمبود آهن با کاربرد روش‌های به‌زراعی یا استفاده از ارقام و پایه‌های متحمل امکان‌پذیر است (۷). مطالعات نشان داده که تنوع ژنتیکی زیادی در پاسخ گیاهان به کمبود آهن وجود دارد. میرسلیمانی و تفضلی بندری (۵) تأثیر پ- هاش محلول غذایی را بر جذب آهن توسط چهار رقم انگور بررسی کردند و گزارش نمودند که تحمل ارقام مختلف به افزایش پ- هاش یکسان نبوده است. آسماکوپولوس و همکاران (۶) نیز حساسیت پایه‌های مختلف هلو را در غلظت‌های مختلف آهن در کشت هیدروپونیک مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که پایه‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی به کمبود آهن نشان دادند. پرادو و آلکانتارا- وارا (۲۷) تحمل به کمبود آهن دانهال‌های بذری 'به' و گلابی پیوندی روی پایه PQBA29 را در شرایط گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داده و نتیجه‌گیری نمودند که گلابی پیوندی روی پایه PQBA29 تحمل بیشتری دارد.

از آنجا که یک راه حل پایدار برای افزایش تولید در مناطقی که دچار کمبود آهن هستند، انتخاب پایه‌های متحمل به کمبود آهن می‌باشد، لذا پژوهش حاضر در جهت تعیین پایه متحمل یا مقاوم به کمبود آهن انجام گرفت. برای این منظور، پاسخ پایه‌های بذری گلابی، 'به'، زالزالک و پایه رویشی کوئینس آ (Quince A) به شرایط کمبود آهن و تأثیر بی‌کربنات در ایجاد این کمبود مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل (۴×۴) در قالب طرح کامل تصادفی در ۴ تکرار و هر تکرار شامل ۲ گیاه در گلخانه آموزشی- پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. به منظور انجام آزمایش، دانهال‌های یکساله پایه‌های بذری گلابی، 'به'، زالزالک و قلمه‌های ریشه‌دار شده پایه رویشی کوئینس آ در گلدان‌های ۷ لیتری حاوی ماسه کشت شدند. پس از کشت، گیاهان به مدت ۲۰ روز با محلول غذایی پایه به همراه ۲۰ میکرومولار آهن تغذیه شدند. ترکیب محلول غذایی پایه مورد استفاده شامل عناصر پرمصرف (برحسب میلی‌مولار): $Ca(NO_3)_2$، ۲؛ K_2SO_4، ۰/۷۵؛ $MgSO_4$، ۰/۶۵؛ KH_2PO_4، ۰/۵؛ $CaCl_2$، ۲ و عناصر کم‌مصرف (برحسب میکرومولار): KCl، ۲۵؛ H_3BO_3، ۲۵؛ $MnCO_4$، ۱؛ $CuSO_4$، ۰/۵؛ $ZnSO_4$، ۰/۵؛ $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$، ۰/۰۵ بود و پ- هاش محلول غذایی در

۶±۰/۱ تنظیم شد (۱۳). پس از استقرار، گیاهان ضمن دریافت محلول غذایی پایه، تحت چهار تیمار مختلف شامل:محلول‌های ۵۰ میکرومولار آهن (شاهد)، ۵۰ میکرومولار آهن+ بی‌کربنات، ۳ میکرومولار آهن و ۳ میکرومولار آهن+ بی‌کربنات به‌مدت ۵۰ روز قرار گرفتند. از کلات آهن (Fe-EDTA) به عنوان منبع آهن و از محلول ۱۰ میلی‌مولار سدیم هیدروژن کربنات ($NaHCO_3$) برای تیمارهای بی‌کربنات استفاده شد. در پایان آزمایش، ارتفاع نهال‌ها، تعداد برگ، کلروفیل نسبی برگ، نشت یونی غشا، غلظت آهن برگ و ریشه و فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در برگ اندازه‌گیری شد.

ارتفاع هر نهال با استفاده از متر از محل طوقه تا انتهای ساقه اندازه‌گیری شد و تعداد برگ‌های کاملاً باز شده هر گیاه نیز شمارش گردید. این دو فاکتور به‌صورت درصد نسبت به شاهد گزارش شده‌اند. غلظت نسبی کلروفیل جوان‌ترین برگ‌های کاملاً توسعه یافته با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (مدل CL-01، شرکت Hansatech instruments Ltd، انگلستان) اندازه‌گیری شد.

نشت یونی غشا با روش لوتس و همکاران (۲۰) اندازه‌گیری شد. به این منظور، در ابتدا ۶ عدد دیسک یک سانتی‌متری از برگ‌های جوان کاملاً توسعه یافته تهیه و در لوله‌های آزمایش قرار داده شد و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه به آنها اضافه گردید و پس از ۲۴ ساعت تکان دادن، قابلیت هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) محلول‌ها اندازه‌گیری شد. سپس، لوله‌های آزمایش به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس اتوکلاو شدند و قابلیت هدایت الکتریکی ثانویه محلول‌ها (EC_2) نیز تعیین شد. در نهایت، درصد نشت یونی غشا با فرمول $(EC_1/EC_2)\times100$ محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری غلظت آهن، برگ و ریشه هر گیاه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن خشک شد. سپس، نمونه‌ها آسیاب و ۱۰۰ میلی‌گرم از آنها درون بوته‌های چینی قرار داده شدند. نمونه‌های گیاهی به مدت دو ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس کوره الکتریکی به خاکستر تبدیل شده و با استفاده از اسید کلریدریک ۲ نرمال عصاره‌گیری شدند. غلظت آهن کل در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی (A Spectrophotometer, WFX-120) اندازه‌گیری شد (۲۹).

برای استخراج آنزیم‌ها، ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌های تازه برگ گیاهان در یک میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (پ- هاش ۷/۸) هموژن شد و سپس به مدت ۲۰ دقیقه با دور ۱۴۰۰۰ g و در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ گردید. فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز در طول موج ۴۷۰ نانومتر و آسکوربات پراکسیداز در طول موج ۲۹۰ نانومتر طی ۲ دقیقه توسط دستگاه طیف‌سنج به ترتیب با روش چنس و مهلی (۹) و ناکانو و آسادا (۲۵) با کمی تغییر محاسبه شد. مخلوط واکنش برای آنزیم گایاکول پراکسیداز شامل: ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم، ۴/۵ میکرولیتر هیدروژن پراکسید ۳۵٪، ۳/۳۵ میکرولیتر گایاکول ۹۵٪ و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی و برای آنزیم آسکوربات پراکسیداز شامل: ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم، ۴/۵ میکرولیتر هیدروژن پراکسید ۳۵٪، ۱۰۰ میکرولیتر آسکوربات ۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده نرم‌افزار آماری Statistix 8 صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع نهال

نتایج نشان داد که با کاهش غلظت آهن در تیمارهای آزمایش، ارتفاع گیاه نسبت به شاهد کاهش یافت. به‌طوری که در تیمار ۳ میکرومولار آهن، ارتفاع گیاه ۲۴٪ نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار کاهش داشت (جدول ۱). حضور بی‌کربنات بر ارتفاع گیاهان تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). نتایج همچنین بیانگر وجود تفاوت ارتفاع در پایه‌های مختلف بود. به گونه‌ای که پایه زالزالک بیشترین ارتفاع را نشان داد و نسبت به پایه 'به' که کمترین میزان این صفت را دارا بود، تقریباً ۲۶/۶ درصد افزایش داشت (جدول ۱).

جدول ۱. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر ارتفاع پایه‌ها (درصد نسبت به شاهد)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۱۰۰/۰۰ a	۹۰/۰۲ ab	۴۹/۹۹ de	۴۰/۷۴ e	۷۰/۱۸ C
گلابی	۱۰۰/۰۰ a	۹۳/۳۰ a	۹۰/۹۶ ab	۸۸/۰۰ ab	۹۳/۰۶ A
زالزالک	۱۰۰/۰۰ a	۹۷/۵۴ a	۹۵/۳۶ a	۹۴/۱۰ a	۹۶/۷۴ A
کوئینس آ	۱۰۰/۰۰ a	۸۴/۷۸ a-c	۶۷/۴۶ cd	۷۳/۷۹ bc	۸۱/۵۰ B
میانگین	۱۰۰/۰۰ A	۹۱/۴۱ A	۷۵/۹۴ B	۷۴/۱۶ B	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

اثر متقابل پایه و تیمارهای مختلف نیز نشان داد که ارتفاع پایه‌های 'به' و کوئینس آ در تیمارهای ۳ میکرومولار آهن نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن به ترتیب حدود ۵۰ و ۳۲ درصد کاهش یافت، در حالی که ارتفاع پایه‌های گلابی و زالزالک در هیچیک از تیمارهای آزمایش کاهش معنی‌داری نشان نداد (جدول ۱). در تأیید نتایج آزمایش حاضر، دونینی و همکاران (۱۶) گزارش نمودند که در شرایط کمبود آهن، یا حضور بی‌کربنات، ارتفاع گیاهان نسبت به شاهد کاهش یافته، ولی گیاهچه‌های رویشی 'به' کاهش ارتفاع بیشتری نسبت به گلابی نشان دادند. گیاهانی که در اثر کمبود آهن دچار زردبرگی شده‌اند یا آهن برگ آنها به علت وجود مقادیر زیاد یون بی‌کربنات غیر فعال شده است، به دلیل نداشتن کلروفیل کافی، عمل فتوسنتز را به‌طور کامل انجام نداده و در نتیجه رشد گیاه کاهش می‌یابد (۲۱). مطالعات نشان داده که تحت شرایط کمبود آهن، ژنوتیپ‌های متحمل مرکبات (۲۶) و گوجه‌فرنگی (۱۲) رشد نسبی بیشتری داشتند. رشد نسبی بیشتر در شرایط کمبود آهن، تحمل بهتر گیاهان را نشان می‌دهد. احتمالاً پایه‌های متحمل، پتانسیل ژنتیکی بهتری در استفاده از حداقل مواد غذایی را داشته که نیازهای تغذیه‌ای آنها را برای رشد بیشتر فراهم می‌کند (۲۶).

تعداد برگ

نتایج آزمایش نشان داد که با کاهش غلظت آهن محلول غذایی، تعداد برگ گیاهان کاهش یافت (جدول ۲). در تیمار ۳ میکرومولار آهن، تعداد برگ نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن، ۲۶/۴ درصد کاهش نشان داد (جدول ۲). وجود بی‌کربنات در هر دو غلظت آهن سبب کاهش این صفت شد، به طوری که تعداد برگ در تیمار ۳ میکرومولار آهن به همراه بی‌کربنات، ۲۰/۹۸ درصد نسبت به تیمار ۳ میکرومولار آهن و در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن به همراه بی‌کربنات، ۱۹/۴۲ درصد نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن، کاهش یافت (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها همچنین نشان داد که تعداد برگ پایه‌های مختلف، متفاوت بود (جدول ۲). کمترین تعداد برگ در پایه 'به' مشاهده شد، که نسبت به پایه زالزالک که بیشترین تعداد برگ را داشت، ۲۳/۲ درصد کمتر بود (جدول ۲). اگرچه نیاز گیاهان به عنصر آهن اندک است ولی اگر مقدار کافی از این عنصر در دسترس نباشد، یا به علت وجود بی‌کربنات جذب آن دچار مشکل شده باشد، رشد و نمو گیاهان دچار اختلال می‌شود (۲۱). ویتی و سینلی (۳۳) گزارش کردند که در پایه‌های رویشی 'به'، تعداد برگ با افزایش غلظت بی‌کربنات و کاهش غلظت آهن در محلول غذایی، کاهش یافت. آنان بیان کردند که کاهش تعداد برگ احتمالاً به خاطر کاهش ارتفاع این گیاهان است.

کلروفیل نسبی برگ

نتایج نشان داد که کاهش غلظت آهن در محلول غذایی سبب کاهش معنی‌دار کلروفیل نسبی برگ شد (جدول ۳). به‌گونه‌ای که در تیمار ۳ میکرومولار آهن، غلظت کلروفیل ۳۷/۳ درصد نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن کاهش یافت (جدول ۳)، حضور بی‌کربنات نیز در هر دو غلظت آهن سبب کاهش

جدول ۲. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر تعداد برگ (درصد نسبت به شاهد)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۱۰۰/۰۰ a	۶۱/۹۸ d	۷۰/۱۹ b-d	۲۵/۵۸ e	۶۴/۴۳ B
گلابی	۱۰۰/۰۰ a	۸۷/۵۴ a-c	۷۳/۶۵ b-d	۶۵/۶۶ cd	۸۱/۷۱ A
زالزالک	۱۰۰/۰۰ a	۷۹/۱۹ a-d	۸۱/۲۶ a-d	۷۵/۱۱ a-d	۸۳/۸۹ A
کوئینس آ	۱۰۰/۰۰ a	۹۳/۶۰ ab	۶۹/۳۲ b-d	۶۶/۲۷ cd	۸۲/۲۹ A
میانگین	۱۰۰/۰۰ A	۸۰/۵۸ B	۷۳/۶۱ B	۵۸/۱۶ C	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

جدول ۳. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر محتوای کلروفیل نسبی برگ

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۱۸/۴۲ b-d	۱۳/۳۵ e	۳/۷۱ g	۰/۹۴ g	۹/۱۰ D
گلابی	۲۳/۲۵ a	۲۴/۳۰ a	۲۳/۴۰ a	۱۶/۰۷ de	۲۰/۷۳ A
زالزالک	۲۱/۰۵ ab	۱۹/۸۷ bc	۱۹/۸۵ bc	۱۹/۰۵ b-d	۱۸/۱۰ B
کوئینس آ	۱۹/۵۰ bc	۱۷/۷۰ cd	۸/۶۸ f	۷/۷۶ f	۱۳/۴۱ C
میانگین	۲۰/۵۵ A	۱۸/۴۳ B	۱۲/۸۸ C	۹/۴۷ D	

میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

کلروفیل نسبی برگ شد، به‌طوری که در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن، حضور بی‌کربنات سبب ۱۰/۳ درصد کاهش نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار و در تیمار ۳ میکرومولار آهن، حضور بی‌کربنات سبب ۲۶/۵ درصد کاهش نسبت به تیمار ۳ میکرومولار آهن در مقدار نسبی کلروفیل برگ شد (جدول ۳). نتایج همچنین نشان دهنده وجود تفاوت در مقدار نسبی کلروفیل برگ پایه‌های مختلف بود. در بین پایه‌های مختلف، بیشترین مقدار نسبی کلروفیل برگ (۲۰/۷۳) مربوط به پایه گلابی بود که نسبت به پایه دانهالی 'به' که کمترین میزان این شاخص را دارا بود (۹/۱)، افزایش بیش از دو برابری را نشان داد (جدول ۳). اثر متقابل پایه و تیمارها نیز نشان داد که گرچه در پایه‌های 'به' و کوئینس آ کاهش غلظت آهن و یا حضور بی‌کربنات سبب کاهش معنی‌دار کلروفیل نسبی برگ شد، اما در پایه زالزالک این صفت تحت تأثیر کاهش غلظت آهن و وجود بی‌کربنات قرار نگرفت (جدول ۳). در پایه گلابی نیز کاهش غلظت آهن تأثیری بر مقدار نسبی کلروفیل برگ نداشت (جدول ۳). کاهش مقدار نسبی کلروفیل برگ در اثر کمبود آهن یا حضور بی‌کربنات در مرکبات (۲۶)، انگور (۱۹) و 'به' و گلابی (۷) نیز گزارش شده است. در برگ‌های جوان گیاهان سبز، کاهش در مقدار کلروفیل (زردی برگ)، آشکارترین نشانه‌ی کمبود آهن است (۲۱). آهن یکی از کوفاکتورهای مهم آنزیم‌های دخیل در مسیر سنتز کلروفیل می‌باشد. از طرف دیگر، ماده لازم برای ساختن کلروفیل، اسید دلتا-آمینولوولینیک (δ-aminolevulinic acid) است که میزان تشکیل آن، به‌وسیله آهن کنترل می‌شود (۲۱). همچنین، بی‌کربنات با ایجاد شرایط بافری در ریزوسفر و آپوپلاست ریشه سبب کاهش جذب آهن و کلروفیل نسبی برگ می‌شود (۱، ۳ و ۲۱). سینلی و همکاران (۱۰) بیان نمودند که پرورش درخت 'به' در خاک‌های آهکی و قلیایی سبب ایجاد زردبرگی آهن می‌شود. در تأیید نتایج آزمایش حاضر، مطالعات نشان داده که گلابی در شرایط کمبود

جدول ۴. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر درصد نشت یونی از غشا

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۳۵/۹۷ e	۳۸/۵۳ e	۴۹/۵۷ cd	۶۰/۲۹ ab	۴۶/۰۹ B
گلابی	۴۳/۲۸ de	۴۵/۳۵ de	۴۵/۳۳ de	۴۵/۱۹ de	۴۴/۷۹ B
زالزالک	۵۸/۷۲ a-c	۶۳/۷۵ a	۶۳/۸۵ a	۶۴/۰۵ a	۶۲/۵۹ A
کوئینس آ	۴۹/۳۳ cd	۵۱/۶۴ b-d	۶۲/۳۱ a	۶۷/۶۰ a	۵۷/۷۲ A
میانگین	۴۶/۸۲ B	۴۹/۸۲ B	۵۵/۲۶ A	۵۹/۲۸ A	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

جدول ۵. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر غلظت آهن برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۳۹۱/۴۶ c	۲۵۹/۶۹ d	۱۳۵/۰۱ ef	۱۵۲/۱۳ ef	۲۳۴/۵۷ C
گلابی	۴۹۵/۷۵ b	۴۵۳/۵۳ bc	۱۷۶/۱۳ d-f	۲۰۵/۵۰ de	۳۳۲/۷۳ B
زالزالک	۶۹۴/۷۶ a	۷۳۷/۴۳ a	۲۵۷/۹۸ d	۲۱۸/۹۵ de	۴۷۷/۲۸ A
کوئینس آ	۲۶۱/۴۵ d	۲۶۱/۹۸ d	۱۴۵/۶۱ ef	۱۰۴/۹۵ f	۱۹۳/۵۰ C
میانگین	۴۶۰/۸۶ A	۴۲۸/۱۶ A	۱۷۸/۶۸ B	۱۷۰/۳۸ B	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

آهن نسبت به پایه‌های 'به' تحمل بیشتری به کاهش کلروفیل دارد (۱۳، ۱۵ و ۲۷) که ممکن است به علت افزایش فعالیت آنزیم احیا کننده کلات- آهن (III) و کاهش پ- هاش در اثر افزایش فعالیت پمپ $ATPase- H^+$ باشد (۱۳).

نشت یونی غشا

نتایج آزمایش نشان داد که با کاهش غلظت آهن در محلول غذایی، نشت یونی غشا افزایش یافت (جدول ۴). در تیمار ۳ میکرومولار آهن، نشت یونی (۵۵/۲ درصد) نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن (۴۶/۸ درصد)، ۱۸٪ افزایش یافت (جدول ۴). حضور بی‌کربنات اثر معنی‌داری بر این شاخص نداشت (جدول ۴). نتایج همچنین نشان داد که پایه‌های مختلف درصد متفاوتی از نشت یونی غشا دارند (جدول ۴). بیشترین میزان نشت یونی غشا (۶۲/۵۹ درصد) در پایه زالزالک مشاهده شد که نسبت به پایه گلابی (۴۴/۷۹ درصد)، که کمترین میزان این صفت را دارا بود، ۳۹/۷۴ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴).

اثر متقابل پایه و تیمارها نیز نشان داد که گرچه در پایه‌های زالزالک و گلابی، نشت یونی غشا تحت تأثیر تیمارهای مختلف به طور معنی‌داری افزایش نیافت (جدول ۴)، اما در پایه 'به'، حضور بی‌کربنات در تیمار ۳ میکرومولار آهن (۶۰/۲۹ درصد) سبب افزایش ۲۱/۶۲ درصد نشت یونی غشا نسبت به تیمار ۳ میکرومولار آهن (۴۹/۵۷ درصد) شد (جدول ۴). اندازه‌گیری میزان آسیب غشای سلولی یک فاکتور مناسب برای مشخص کردن خسارت اکسیداتیو تحت تنش‌های غیر زنده، از جمله کمبود آهن، است. گزارش شده که در ارقام حساس هلو (۸) و انگور (۱۹) در شرایط کمبود آهن ناشی از وجود بی‌کربنات، میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشا افزایش یافته است. تحت شرایط کمبود آهن، دیواره سلولی در اثر افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن تخریب شده و محتویات سلولی به بیرون تراوش نموده و هدایت الکتریکی محیط را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب، با افزایش حساسیت رقم به کمبود آهن، نشت یونی غشاء نیز افزایش می‌یابد (۱۹).

جدول ۶. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر غلظت آهن ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۸۴۰۹/۶۰ a	۵۸۰۲/۶۰ de	۳۳۵۵/۸۰ i	۳۵۷۲/۶۰ hi	۵۲۸۵/۱۰ C
گلابی	۷۹۲۹/۲۰ a	۷۵۴۱/۰۰ ab	۵۰۵۳/۴۰ d-f	۶۰۱۵/۶۰ cd	۶۶۳۴/۸۰ A
زالزالک	۶۸۸۷/۸۰ bc	۶۸۶۴/۷۰ bc	۵۰۰۷/۸۰ ef	۴۶۸۹/۹۰ fg	۵۸۶۲/۵۰ B
کوئینس آ	۵۷۱۲/۶۰ de	۳۴۴۵/۳۰ hi	۴۳۳۵/۶۰ f-h	۳۸۶۱/۶۰ g-i	۴۳۳۸/۸۰ D
میانگین	۷۲۳۴/۸۰ A	۵۹۱۳/۴۰ B	۴۴۳۸/۱۰ C	۴۵۳۴/۹۰ C	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

غلظت آهن در برگ و ریشه

نتایج نشان داد که غلظت آهن در برگ با کاهش غلظت آهن در تیمارهای آزمایش کاهش یافت (جدول ۵). غلظت آهن برگ در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن (۴۶۰/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) ۲/۵۷ برابر نسبت به تیمار ۳ میکرومولار آهن (۱۷۸/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) بیشتر بود. نتایج همچنین نشان داد که حضور بی‌کربنات در هر دو غلظت آهن در محلول غذایی تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن برگ نداشت (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها بیانگر آن است که غلظت آهن برگ در پایه‌های مختلف، متفاوت بود، به گونه‌ای که بیشترین غلظت آهن برگ در پایه زالزالک وجود داشت که نسبت به پایه کوئینس آ (۱۹۳/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) که کمترین غلظت آهن برگ را دارا بود، افزایش بیش از دو برابری را نشان داد (جدول ۵).

اثر متقابل بین پایه و تیمارهای مختلف نیز نشان داد که گرچه غلظت آهن برگ پایه 'به' در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن و حضور بی‌کربنات (۲۵۹/۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) به طور معنی‌داری نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن (۳۹۱/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) کاهش یافت، اما این تیمارها در سایر پایه‌ها تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵).

نتایج نشان داد که با کاهش غلظت آهن در محلول غذایی، غلظت آهن در ریشه کاهش یافت، به طوری که غلظت آهن ریشه ۳۸/۶۵ درصد در تیمار ۳ میکرومولار آهن نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن، کاهش یافت (جدول ۶). حضور بی‌کربنات تنها در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن سبب کاهش معنی‌دار غلظت آهن ریشه نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۶). نتایج همچنین نشان دهنده وجود تفاوت در غلظت آهن ریشه در پایه‌های مختلف بود (جدول ۶). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با این که در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن، وجود بی‌کربنات سبب کاهش معنی‌دار غلظت آهن ریشه پایه‌های 'به' (۳۱ درصد) و کوئینس آ (۳۹/۶۸ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد، ولی در دو پایه دیگر از این نظر تفاوت معنی‌داری ایجاد نکرد (جدول ۶).

در تأیید نتایج مربوط به غلظت آهن برگ و ریشه، مطالعات نشان داده که کاهش غلظت آهن، به‌ویژه در حضور بی‌کربنات، در محلول غذایی یا محیط کشت، باعث کاهش آهن برگ و ریشه پایه‌های هلو (۲۳) و گلابی و 'به' (۱۵ و ۱۶) شد. آهن دو ظرفیتی، شکل قابل جذب آهن توسط گیاه است. بنابراین، آهن سه ظرفیتی پیش از جابه‌جایی به درون سیتوپلاسم، باید در سطح ریشه احیا شود (۲۱). در جابه‌جایی مسافت دور از راه آوند چوبی، میزان زیاد ترکیبات آهن سه ظرفیتی با سیترات وجود دارد (۳). از طرف دیگر، شکل فعال آهن موجود در گیاهان، آهن دوظرفیتی است. بنابراین، احیای آهن سه ظرفیتی در آپوپلاست سلول‌های برگ دومین مرحله ضروری برای دسترسی سلول‌های برگ به این عنصر می‌باشد (۲۱). برای احیای آهن سه ظرفیتی در آپوپلاست برگ‌های سالم، مناسب‌ترین پ- هاش حدود ۵ است (۲۱)، در صورتی که در

جدول ۷. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر غلظت گایاکول پراکسیداز (میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۲۳۳/۰۸ b	۱۳۷/۲۲ ef	۹۲/۱۱ f-h	۶۰/۱۵ h	۱۳۰/۶۴ B
گلابی	۸۴/۵۹ f-h	۷۳/۳۱ gh	۳۹/۴۷ h	۴۲/۶۱ h	۵۹/۹۹ C
زالزالک	۱۸۰/۴۵ b-e	۱۵۷/۹۰ de	۱۷۱/۶۸ c-e	۱۳۳/۴۶ e-g	۱۶۰/۸۷ B
کوئینس آ	۳۰۴/۵۱ a	۱۹۹/۲۵ b-d	۲۱۹/۳۰ bc	۲۱۹/۹۲ bc	۲۳۵/۷۵ A
میانگین	۲۰۰/۶۶ A	۱۴۱/۹۲ B	۱۳۰/۶۴ B	۱۱۴/۰۳ B	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

گیاهان چوبی رشد کرده در محیط‌های آهکی، غلظت نسبتاً زیادی از بی‌کربنات سبب افزایش pH محیط ریشه و شیره آوند چوبی (پ–هاش بین ۷/۵ تا ۸/۵) شده و در نتیجه آن جذب و انتقال آهن به بخش هوایی گیاه دچار اختلال می‌شود (۲ و ۳۱). دونینی و همکاران (۱۵) گزارش کردند که پایه‌های رویشی 'به' در شرایط کمبود آهن، نسبت به پایه گلابی، میزان آهن برگ و ریشه کمتری داشتند. در آزمایش حاضر، غلظت آهن برگ گلابی کمتر، ولی در ریشه این گیاه بیشتر از زالزالک بود که این ممکن است به دلیل پتانسیل بیشتر زالزالک در انتقال آهن به برگ باشد که توسط مولاسیوتیس و همکاران (۲۳) در پایه‌های هلو نیز گزارش شده است. همچنین، غلظت کمتر آهن ریشه پایه کوئینس آ کارآیی انتقال آهن بیشتر این پایه را نسبت به پایه بذری 'به' تأیید می‌کند.

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز با کاهش غلظت آهن در تیمارهای آزمایش، کاهش یافت (جدول ۷). فعالیت این آنزیم ۳۴/۹ درصد در تیمار ۳ میکرومولار آهن (۱۳۰/۶۴ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر) نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن (۲۰۰/۶۶ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر) کاهش نشان داد (جدول ۷). حضور بی‌کربنات در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن سبب کاهش ۲۹/۲۷ درصدی فعالیت این آنزیم نسبت به تیمار شاهد شد. مقایسه میانگین‌ها بیانگر تفاوت در فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در پایه‌های مختلف بود. بیشترین فعالیت این آنزیم در پایه کوئینس آ (۲۳۵/۷۵ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر) مشاهده شد که نسبت به پایه گلابی (۵۹/۹۹ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر)، که کمترین میزان این آنزیم را دارا بود، حدود ۴ برابر بیشتر بود (جدول ۷).

اثر متقابل بین پایه و تیمارهای مختلف نیز نشان داد که گرچه در پایه‌های گلابی و زالزالک، غلظت‌های مختلف آهن و حضور بی‌کربنات اثر معنی‌داری بر کاهش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز نداشت، اما در پایه‌های 'به' و کوئینس آ فعالیت این آنزیم به طور معنی‌داری با کاهش غلظت آهن، کاهش یافت. در تأیید نتایج آزمایش حاضر، گزارش شده که تحت شرایط کمبود آهن، فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در پایه‌های هلو (۸ و ۲۳) و انگور (۱۹) کاهش یافته است. کمبود آهن و یا وجود بی‌کربنات در خاک یا محلول غذایی به‌عنوان یک تنش غیر زیستی، منجر به انباشتگی رادیکال‌های آزاد اکسیژن نظیر سوپراکسید (O_2^-) و هیدروژن پراکسید (H_2O_2) می‌شود (۲۲). یکی از سیستم‌های دفاعی گیاهان در مقابل آسیب‌های اکسیداتیو، تولید آنزیم گایاکول پراکسیداز است. این آنزیم، با تخریب هیدروژن پراکسید، به تحمل گیاه در مقابل تنش کمک می‌کند. از طرف دیگر، عنصر آهن در ساختار آن نقش دارد. بنابراین، در شرایط کمبود این عنصر، فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز نیز کاهش یافته و سیستم دفاعی گیاهان

جدول ۸. اثر غلظت‌های مختلف آهن، در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، بر غلظت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر)

پایه	آهن ۵۰ (µM)	آهن ۵۰ (µM)+ بی‌کربنات	آهن ۳ (µM)	آهن۳ (µM) + بی‌کربنات	میانگین
'به'	†۳۰۳۵/۷۰ a	۱۰۵۳/۶۰ c-e	۸۹۲/۹۰ d-f	۱۴۴۶/۴۰ bc	۱۶۰۷/۱۰ A
گلابی	۸۰۳/۶۰ d-g	۳۶۶/۱۰ gh	۳۵۷/۱۰ gh	۳۰۹/۵۰ gh	۴۵۹/۱۰ C
زالزالک	۱۶۳۱/۰۰ b	۴۸۲/۱۰ f-h	۴۴۰/۵۰ f-h	۳۰۳/۶۰ h	۷۱۴/۳۰ B
کوئینس آ	۱۱۵۱/۸۰ b-d	۳۹۲/۹۰ gh	۵۱۷/۹۰ f-h	۵۸۳/۳۰ e-h	۶۶۱/۵۰ BC
میانگین	۱۶۵۵/۵۰ A	۵۷۳/۷۰ B	۵۵۲/۱۰ B	۶۶۰/۷۰ B	

† میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ آزمون LSD ندارند.

مختل می‌شود (۱۸ و ۲۲). سلینی و همکاران (۸) بیان نمودند که در پایه حساس به زردبرگی آهن هلو، فعالیت گایاکول پراکسیداز در تیمار آهن کافی به همراه بی‌کربنات، ۳۰٪ نسبت به شاهد کاهش یافت. در حالی که در پایه متحمل، کاهش فعالیت این آنزیم تحت تأثیر این تیمار قرار نگرفت. ریشه پایه متحمل توانایی تولید پروتون بیشتری دارد که اثر منفی بی‌کربنات را خنثی می‌کند. همچنین، سبب افزایش حلالیت و جذب آهن شده و بنابراین، پتانسیل بهتری برای مقابله با شرایط تنش دارد (۲۳). برهمکنش کمتر با سایر عناصر، تولید کلات‌ها یا ترکیبات ذخیره‌ای و یا فرایندهای فتوشیمیایی داخلی که دسترسی به آهن و مصرف آن را تنظیم می‌کنند، و یا سطح جذب بیشتر به واسطه توسعه ریشه، از عوامل دیگری هستند که سبب تحمل بیشتر برخی پایه‌ها به شرایط کمبود آهن می‌شوند (۳).

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

با کاهش غلظت آهن در تیمارهای آزمایش، فعالیت این آنزیم نیز کاهش یافت، به‌طوری که فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ۶۶/۶۵ درصد در تیمار ۳ میکرومولار آهن نسبت به تیمار ۵۰ میکرومولار آهن کمتر بود (جدول ۸). حضور بی‌کربنات تنها در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن سبب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌میزان ۶۵/۳۴ درصد نسبت به شاهد شد. مقایسه میانگین‌ها بیانگر آن است که فعالیت این آنزیم در پایه‌های مختلف، متفاوت بود (جدول ۸). بیشترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۱۶۰۷/۱ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر) در پایه 'به' وجود داشت که نسبت به پایه گلابی (۴۵۹/۱ میکرومولار هیدروژن پراکسید بر دقیقه بر گرم وزن تر) ۳/۵ برابر بیشتر بود.

اثر متقابل پایه و تیمارهای مختلف نشان داد که در پایه گلابی، کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز تحت تأثیر هیچ‌یک از تیمارها قرار نگرفت. در مقابل، حضور بی‌کربنات در تیمار ۵۰ میکرومولار آهن سبب کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در پایه‌های 'به'، زالزالک و کوئینس آ نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۸). مولاسیوتیس و همکاران (۲۳) گزارش نمودند که کمبود آهن موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در پایه‌های هلو، در شرایط کمبود آهن و حضور بی‌کربنات، گردید.

آنزیم آسکوربات پراکسیداز از دیگر آنزیم‌های مهم آنتی‌اکسیدان از بین برنده پراکسید هیدروژن در گیاهان می‌باشد که به عنوان شاخص زیستی جهت بررسی خسارت وارده ناشی از کمبود عناصر ریزمغذی، مثل آهن، به‌کار می‌رود. آهن در جایگاه فعال این آنزیم وجود دارد و در شرایط کمبود آهن، فعالیت این آنزیم نیز کاهش می‌یابد. غلظت زیاد یون بی‌کربنات موجب کاهش قابلیت استفاده آهن توسط گیاه و غیرفعال شدن آن در گیاه می‌شود (۲) که در نتیجه آن فعالیت آنزیم‌های حاوی آهن نیز کاهش می‌یابد (۲۲ و ۲۳). داسگان و همکاران (۱۲) گزارش کردند که آنزیم آسکوربات پراکسیداز در هر دو رقم

متحمل و حساس، با کمبود آهن در محلول غذایی به شدت کاهش یافت. با توجه به کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با کاهش غلظت آهن در محلول غذایی، در پایه زالزالک، که با توجه به شاخص‌های بررسی شده فوق، تحمل بیشتری در شرایط کمبود آهن نشان داد، می‌توان گفت که آنزیم گایاکول پراکسیداز نسبت به آسکوربات پراکسیداز شاخص مناسب‌تری برای انتخاب ارقام متحمل است (۱۲).

نتیجه‌گیری

به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پایه بذری 'به' نسبت به سایر پایه‌های مورد مطالعه، در شرایط کمبود آهن، زردی برگ بیشتر و غلظت آهن برگ و ریشه کمتری داشت. همچنین، ارتفاع گیاه و تعداد برگ کمتر این پایه نشانگر پتانسیل رشد و سازگاری کمتر آن در شرایط کمبود آهن است. همچنین، در محلول غذایی با آهن ۵۰ میکرومولار، وجود بی‌کربنات تا حدودی سبب ایجاد شرایطی مشابه با تیمارهای آهن ۳ میکرومولار شد و آسیب ناشی از آن در پایه 'به' بسیار مشهود بود. در مقابل، پایه‌های گلابی و زالزالک کمتر تحت تأثیر شرایط کمبود آهن، چه در حضور یا عدم حضور بی‌کربنات، قرار گرفتند. این پایه‌ها پتانسیل رشدی بهتری در شرایط کمبود آهن نشان دادند. همچنین، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پایه رویشی کوئینس آ از نظر تحمل به کمبود آهن، بعد از پایه‌های گلابی و زالزالک قرار دارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات و همکاری‌های خانم مهندس افاضل، خانم مهندس دانش‌بخش و آقای محمدی در طول اجرای این طرح صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. امکانات مالی و تجهیزات لازم برای انجام این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی اصفهان و قطب زیست فناوری بیماری‌های درختان مهم میوه منطقه مرکزی ایران فراهم گردیده است که بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی اعلام می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. سالاردینی، ع. ا. ۱۳۷۱. حاصلخیزی خاک. انتشارات دانشگاه تهران، ۴۴۰ صفحه.

۲. کلباسی، م. ۱۳۷۴. کلروز آهن در گیاهان و راه‌های مبارزه با آن. روابط عمومی سازمان پارک‌ها و فضای سبز شهر اصفهان، ۳۱ صفحه.

۳. مصباح، ب. و م. پیرمرادیان. ۱۳۷۹. تغذیه درختان میوه. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۵ صفحه.

۴. منیعی، ع. ۱۳۷۳. گلابی و 'به' و پرورش آنها. انتشارات فنی ایران، ۱۱۳ صفحه.

۵. میرسلیمانی، ع. و ع. تفضلی بندری. ۱۳۸۵. تأثیر pH محلول غذایی بر جذب آهن توسط چهار رقم انگور (*Vitis vinfera* L.). پژوهش و سازندگی ۷۱: ۱۲-۱۸.

6. Assimakopoulou, A., C.D. Holevas and K. Fasseas. 2011. Relative susceptibility of some *Prunus* rootstocks in hydroponics to iron deficiency. J. Plant Nutr. 34: 1014-1033.

7. Carrera, M. and E. Ortiz. 1984. Performance of three quince rootstocks for pears. Acta Hort. 161: 231-245.

8. Cellini, A., F.J. Corpas, J.B. Barroso and A. Masia. 2011. Nitric oxide content is associated with tolerance to bicarbonate-induced chlorosis in micropropagated *Prunus* explants. J. Plant Physiol. 168: 1543-1549.

9. Chance, B. and A.C. Maehly. 1955. Assay of catalase and peroxidases. Methods Enzymol. 2: 764-775.

10. Cinelli, F., F. Loreti and R. Muleo. 2004. Regeneration and selection of quince BA29 (*Cydonia oblonga* Mill.) somaclones tolerant to lime-induced chlorosis. Acta Hort. 658: 573-579.

11. Cinelli, F. 1995. Physiological responses of clonal quince root-stocks to iron-deficiency induced by addition of bicarbonate to nutrient solution. J. Plant Nutr. 18: 77-89.

12. Dasgan, H.Y., L. Ozturk, K. Abak and I. Cakmak. 2003. Activities of iron-containing enzymes in leaves of two tomato genotypes differing in their resistance to Fe chlorosis. J. Plant Nutr. 26: 1997-2007.

13. De la Guardia, M.D. and E. Alcantara. 2002. A comparison of ferric-chelate reductase and chlorophyll and growth ratios as indices of selection of quince, pear and olive genotypes under iron deficiency stress. Plant Soil 241: 49-56.
14. Devyatov, A.S. 1994. Development of root system of pear trees on seedling and quince rootstocks. J. Plant Nutr. 17: 1963-1973.
15. Donnini, S., A. Castagna, A. Ranieri and G. Zocchi. 2009. Differential responses in pear and quince genotypes induced by Fe deficiency and bicarbonate. J. Plant Physiol. 166: 1181-1193.
16. Donnini, S., F. Cinelli, L. Sensale, R. Muleo, G. Zocchi and A. Ranieri. 2008. Pear plantlets cultured 'in vitro' under lime-induced chlorosis display a better adaptive strategy than quince plantlets. Plant Cell Tiss. Org. 93: 191-200.
17. Gogorcena, Y., J. Abadia and A. Abadia. 2005. A new technique for screening iron-efficient genotypes in peach rootstocks: Elicitation of root ferric chelate reductase by manipulation of external iron concentrations. J. Plant Nutr. 27: 1701-1715.
18. Khoshgoftar, A., H. Shariatmadari, N. Karimian and M. Khajehpour. 2006. Responses of wheat genotypes to zinc fertilization under saline soil conditions. J. Plant Nutr. 29: 1543-1556.
19. Ksouri, R., S. Mrah, M. Gharsalli and M. Lachaal. 2006. Biochemical responses to true and bicarbonate-induced iron deficiency in grapevine genotypes. J. Plant Nutr. 29: 305-315.
20. Lutts, S., J. Kinet and J. Bouharmont. 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. J. Exp. Bot. 46: 1843-1852.
21. Mengel, K. 1994. Iron availability in plant tissues-iron chlorosis on calcareous soils. Plant Soil 165: 275-283.
22. Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci. 7: 405-410.
23. Molassiotis, A., G. Tanou, G. Diamantidis, A. Patakas and I. Therios. 2006. Effects of 4-month Fe deficiency exposure on Fe reduction mechanism, photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense in two peach rootstocks differing in Fe deficiency tolerance. J. Plant Physiol. 163: 176-185.
24. Muleo, R., M. Fisichella, C. Iacona, R. Viti and F. Cinelli. 2000. Different responses induced by bicarbonate and iron deficiency on microshoots of quince and pear. Acta Hort. 596: 677-681.
25. Nakano, Y. and K. Asada. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiol. 22: 867-880.
26. Pestana, M., A. Varennes, J. Abadía and E.A. Faria. 2005. Differential tolerance to iron deficiency of *Citrus* rootstocks grown in nutrient solution. Sci. Hort. 104: 25-36.
27. Prado, R. and E. Alcantara-Vara. 2011. Tolerance to iron chlorosis in non-grafted quince seedlings and in pear grafted onto quince plants. J. Soil Sci. Plant Nutr. 11: 119-128.
28. Ranieri, A., A. Castagna, B. Baldan and G.F. Soldatini. 2001. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. J. Exp. Bot. 52: 25-35.
29. Rengel, Z. and V. Romheld. 2000. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency. Plant Soil 222: 25-34.
30. Romera, F., E. Alcántara and M. Guardia. 1991. Characterization of the tolerance to iron chlorosis in different peach rootstocks grown in nutrient solution. Plant Soil 130: 121-125.
31. Romheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. J. Plant Nutr. 23: 1629-1643.
32. Tagliavini, M., A.D. Rombola and B. Marangoni. 1995. Response to iron-deficiency stress of pear and quince genotypes. J. Plant Nutr. 18: 2465-2482.
33. Viti, R. and F. Cinelli. 1993. Lime-induced chlorosis in quince rootstocks: methodological and physiological aspects. J. Plant Nutr. 16: 631-641.