

مقایسه روش محلول پاشی و مصرف خاکی آهن بر ویژگی فیزیولوژیکی - بیوشیمیایی و آهن فعال گیاه یونجه یکساله (*Medicago scutellata* L.) در مقادیر مختلف آهک در خاک

زهرا قشلاقی^۱، رضا خراسانی^{۲*}، محمد کافی^۳ و امیر فتوت^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۸)

چکیده

کاهش حلالیت آهن در خاک‌های آهکی منجر به بروز علائم زردبرگی در گیاه می‌شود. به منظور بررسی پاسخ گیاه یونجه یک‌ساله به کمبود مستقیم و غیر مستقیم آهن، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل سه سطح آهک (صفر، چهار و هشت درصد) و پنج سطح آهن (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک و صفر و ۲/۱ میکرومولار آهن به صورت محلول پاشی) بود. دو غلظت صفر آهن در روش مصرف خاکی و محلول پاشی آهن به ترتیب به عنوان کنترل خاکی و محلول پاشی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که افزودن هشت درصد آهک به خاک در تیمارهای کنترل موجب بروز علائم زردبرگی، کاهش غلظت کلروفیل، آهن کل و فعال برگ، پروتئین، محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشا و افزایش غلظت ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی برگ نسبت به سطح صفر درصد آهک شد؛ در حالی که کاربرد خاکی و محلول پاشی آهن موجب بهبود علائم زردبرگی، افزایش غلظت کلروفیل، آهن و پروتئین برگ شد که با کاهش معنی دار غلظت ترکیبات فنولیک در هر سه سطح آهک همراه بود. کاربرد محلول پاشی برگ در سه سطح آهک، موجب افزایش در جذب آهن کل و فعال برگ نسبت به دو تیمار مصرف خاکی شد. در حالی که محلول پاشی آهن در دو سطح چهار و هشت درصد آهک، موجب کاهش معنی داری در غلظت ترکیبات فنولیک نسبت به دو تیمار مصرف خاکی شد. بیشترین غلظت کلروفیل برگ در بالاترین سطح آهک، در دو تیمار ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک و محلول پاشی آهن مشاهده شد. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از روش محلول پاشی آهن در خاک‌های آهکی برای کاهش اثرات زردبرگی ناشی از آهک توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی، زردبرگی، کربنات کلسیم، Fe-EDDHA

۱، ۲ و ۴. به ترتیب دانش‌آموخته دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khorasani@um.ac.ir

مقدمه

آهن یکی از فراوانترین عناصر در پوسته کره زمین محسوب می‌شود با این حال در محیط‌های غنی از اکسیژن، این عنصر در فرم فریک (Fe^{3+}) و عمدتاً به صورت اکسید و هیدروکسید یافت می‌شود که بسیار پایدار است و در pH طبیعی به ندرت به حالت محلول در می‌آید. به همین دلیل معمولاً غلظت آهن در خاک بسیار کمتر از غلظت مورد نیاز برای رشد بهینه گیاه است (۳۹). این مسئله به‌ویژه در خاک‌های آهکی که ۳۰ درصد خاک‌های زمین را تشکیل می‌دهند، تشدید می‌شود. گیاهان رشد یافته در خاک‌های آهکی معمولاً علائم کمبود آهن را به صورت زردبرگی (iron deficiency chlorosis, IDC) نشان می‌دهند؛ این پدیده یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی و یکی از عوامل محدودکننده در جذب آهن و سایر فلزات کم‌مصرف از جمله منگنز و مس (۱۱) محسوب می‌شود که نتیجه آن کاهش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی در خاک‌های آهکی است (۷). زردبرگی ناشی از آهک نتیجه عوامل متعددی است که فراهمی زیستی، جذب و یا مصرف آهن توسط گیاهان را محدود می‌کند (۱) در میان این عوامل، قلیائیت خاک یکی از رایج‌ترین عوامل ایجاد کننده این اختلال تغذیه‌ای است که معمولاً با حضور غلظت زیاد یون‌های بی‌کربنات و کربنات‌ها در محلول خاک یا آب‌های آبیاری همراه است (۱۹). غلظت‌های زیاد بی‌کربنات در محلول خاک، اگرچه به‌عنوان بافر عمل می‌کند اما pH محلول خاک را افزایش می‌دهد و از این رو موجب کاهش فراهمی آهن در محلول خاک می‌شود و همچنین به دلیل نفوذ این آنیون‌ها به داخل آپوپلاست سلول‌های ریشه و خنثی کردن دفع پروتون، جذب آهن توسط سلول‌های ریشه را کاهش می‌دهد؛ این اتفاق حتی در حضور منابعی از آهن مانند سکوسترین آهن (Fe (III) -EDDHA) که در رنج وسیعی از pH (۴-۹) قابلیت فراهمی آهن در محلول خاک را دارد، نیز اتفاق می‌افتد. (۳۲) بنابراین، زردبرگی ناشی از آهک یا کمبود غیرمستقیم آهن (IDC) فراتر از کمبود مستقیم آهن (Direct Deficiency, DD) در pH طبیعی است. هرچند زردبرگی در هر دو مورد رخ می‌دهد، اما

کاملاً مشخص نیست که این دو علائم کاملاً معادل یکدیگر باشند. غلظت‌های زیاد بی‌کربنات در خاک‌های آهکی همراه با pH قلیایی باعث ایجاد سمیت در سلول‌های گیاهی از طریق تولید رادیکال‌های آزاد (ROS) می‌شوند. مطالعات اخیر نشان دادند که تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی، یکی از مکانیسم‌های دفاع غیر آنزیمی گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو القا شده در شرایط تنش شوری و قلیائیت است. این ترکیبات علاوه بر اینکه به‌عنوان گیرنده رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش عمل می‌کنند، به‌عنوان تعدیل‌کننده در جذب آهن نقش چندگانه‌ای دارند، فنولیک‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم حلالیت آهن را بهبود دهند که عمدتاً به دلیل قابلیت احیاکنندگی و تشکیل کلات در آنهاست یا استفاده مجدد از آهن آپوپلاستی ریشه را تسهیل کنند و با فعالیت آللوپاتی که دارند جوامع میکروبی ریزوسفر را تحت تأثیر قرار دهند تا به تولید سیدروفور و آکسین بپردازند (۳۷).

گیاهان مختلف در حساسیت و مقاومت خود به کمبود آهن متفاوت هستند. تنوع در توانایی جذب و انتقال آهن در گیاه در بسیاری از گونه‌ها مشاهده شده است. برخی از گونه‌ها به کمبود آهن با واکنش‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی واکنش نشان می‌دهند که در نتیجه آن آهن بیشتری جذب گیاه می‌شود. این گیاهان به‌عنوان گیاهان آهن کارا طبقه بندی می‌شوند (۱۴). یونجه یک‌ساله یکی از مهم‌ترین گیاهان خانواده لگوم است که به شرایط خاک‌های آهکی سازگار است و به‌طور طبیعی در زیستگاه‌هایی با شرایط خاک‌های آهکی و قلیایی رویش می‌کند، از ۳۴ گونه موجود در جهان؛ ۲۳ گونه آن در ایران یافت شده است (۱۵ و ۳۰). در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران به دلایلی همچون کمی بارش، قلیایی بودن خاک‌ها و بالا بودن میزان آهک خاک، یونجه‌های یک‌ساله مناسب‌ترین لگوم‌ها برای اجرای تناوب غله - مرتع هستند. این گیاه دارای ارزش اقتصادی و زیست‌محیطی بسیاری است و می‌تواند در شرایط خاک‌های شور، قلیا و یا خاک‌های آلوده به عناصر سنگین رشد کند (۲). بر اساس اطلاعات موجود، هیچ‌گونه علائمی از

دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به اجرا درآمد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو شکل مصرف آهن با غلظت‌های مختلف (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک به صورت مصرف خاکی و صفر و ۲/۱ میکرومولار آهن به صورت محلول پاشی) و سه سطح آهک (صفر، چهار و هشت درصد) در سه تکرار روی گیاه یونجه یک‌ساله (*Medicago scutellata* (L.) Mill.) انجام گرفت. در این آزمایش غلظت صفر میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک به عنوان کنترل خاکی (Control-S) و غلظت صفر میلی‌گرم آهن بر لیتر آب، به مفهوم برگ‌پاشی با آب مقطر، به عنوان کنترل محلول پاشی (control-F) نام‌گذاری شد. در هر دو روش مصرف آهن، منبع آهن از کود سکوسترین آهن شش درصد (Fe-EDDHA) و آهک به صورت کربنات کلسیم خالص تأمین شد. انتخاب غلظت‌های آهن بر اساس عرف منطقه برای گیاهان زراعی و منابع موجود انتخاب شد (۳ و ۱۰) با توجه به هدف آزمایش و نیاز داشتن به خاکی با درصد کم آهک، خاک مورد نیاز در این آزمایش از منطقه کشاورزی اطراف چناران، مشهد- خراسان رضوی (عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی؛ طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۶ دقیقه شرقی) جمع‌آوری شد و بعد از هوا خشک کردن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد، بافت خاک و برخی از ویژگی‌های خاک نمونه‌برداری شده آزمایش و از این خاک برای اعمال تیمارها و ادامه آزمایش استفاده شد (جدول ۱). با توجه به نتایج آنالیز خاک و سطح بحرانی آهن قابل دسترس (Fe-DTPA) برای بیشتر گیاهان در خاک که معادل پنج میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است (۲۴)، خاک مورد استفاده در این آزمایش در شرایط کمبود آهن قرار داشت.

نحوه اعمال تیمارها

به منظور به تعادل رسیدن خاک اولیه با آهک، خاک به مدت دو ماه با صفر، چهار و هشت درصد آهک با ایجاد چرخه‌های مرطوب کردن (۵۰ درصد رطوبت زراعی) و هوا خشک کردن متوالی به تعادل رسید. سپس بر اساس تیمارها کود سکوسترین آهن به

زردبرگی در این گیاه در شرایط رشد مزرعه (طبیعی) مشاهده نشده است. بر این اساس از این گیاه به عنوان یک گیاه مدل (مقاوم به شرایط آهکی خاک) برای شناسایی مکانیسم‌های سازگاری گیاه به زردبرگی ناشی از آهک استفاده شد.

پدیده IDC معمولاً با استفاده از مصرف خاکی کلات‌های مصنوعی آهن فریک کنترل می‌شود، اما این دسته از کودها به طور کامل نتوانسته‌اند در کاهش IDC در این خاک‌ها موفق باشند، این روش باید سالانه تکرار شود زیرا آهن به سرعت در خاک غیر متحرک می‌شود و از سوی دیگر، عوامل کلات‌کننده ممکن است جذب فلزات دیگر مانند منگنز، مس و نیکل را نیز برای گیاه تحت تأثیر قرار دهد (۳). با این حال محلول پاشی آهن اگر در زمان مناسب اعمال شود می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های کارآمد برای اصلاح زردبرگی محسوب شود (۱۰). روش محلول پاشی نسبت به روش کاربرد خاکی آهن به دلیل مصرف کمتر کودهای آهن از لحاظ اقتصادی سودآور و سازگار با محیط زیست محسوب می‌شود. پژوهش‌های زیادی همچنان در حال شناسایی روشی مؤثر برای بهبود وضعیت تغذیه آهن در گیاهان، به ویژه در شرایط خاک‌های آهکی هستند و باید با توجه به شرایط خاکی، نوع گیاه و نوع تنش مربوطه، بهترین روش مؤثر در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه انتخاب شود تا بتواند علاوه بر کاهش اثرات کلروز کمبود آهن با کاهش مصرف کودها باعث حفاظت از محیط زیست شود. از این رو توجه به مدیریت تغذیه‌ای گیاهان و مکانیسم‌های سازگاری آنها به زردبرگی ناشی از آهک ضروری است تا بتوان رشد گیاهان را در شرایط خاک‌های آهکی از طریق رویکردهای مناسب بهبود بخشید. با توجه به مطالب بالا این پژوهش با دو هدف اصلی بررسی تأثیرات مصرف خاکی و محلول پاشی آهن بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه و شناسایی روشی کارآمد برای اصلاح زردبرگی در شرایط خاک‌های آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

تیمارهای آزمایش و نمونه‌برداری خاک

این آزمایش به صورت کشت گلدانی در سال ۱۳۹۶ در گلخانه

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های خاک نمونه‌برداری شده در آزمایش (فسفر و پتاسیم قابل استفاده برای گیاه)

| آهن قابل دسترس | فسفر پتاسیم | کربنات کلسیم معادل فعال | کربنات کلسیم معادل کل | کربن آلی | نیترژن کل | CEC | EC _e | |
|---------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------|----------|-----------|-------------------------------------|-----------------|--------------------|
| | | | | | | | pH | (دسی‌زیمنس بر متر) |
| (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) | | | (درصد) | | | (سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم خاک) | | |
| ۳/۶ | ۳۱۷/۴ | ۳۸/۵ | ۱/۹ | ۵/۷ | ۱/۲ | ۰/۱۰۲ | ۱۲/۲۱ | ۷/۷ |

ICP-OES مدل (Spectro, Arcos, Germany) برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاهی اندازه‌گیری و گزارش شد (۱۸).

محتوای نسبی آب برگ و شاخص پایداری غشا (RWC, MSI):

RWC با استفاده از روش ویتزلی و همکاران (۴۰) و با اندازه‌گیری وزن تازه، آب‌گیری شده و خشک نمونه‌های برگ به صورت درصد محاسبه شد. میزان پایداری غشا از طریق اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیتی برگ با استفاده از روش دیشموخت (۱۲) ارزیابی شد.

کلروفیل کل

به منظور عصاره‌گیری و تعیین کلروفیل کل، بافت تازه برگ با حلال استون ۸۰ درصد ساییده و عصاره‌گیری شد. سپس محلول مدنظر در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۲۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. میزان جذب نور در محلول حاصل در دو طول موج ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر اندازه‌گیری و میزان کلروفیل کل با استفاده از روش آرنون (۵) برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ محاسبه شد.

سنجش غلظت پروتئین به روش برادفورد

به منظور استخراج پروتئین از برگ‌های گیاه یونجه اسکوتالاتا، یک گرم بافت تازه برگ در هاون چینی با بافر TRIS-HCl ۰/۰۵ مولار با (pH=۷/۵) به طور کامل در دمای صفر تا چهار درجه سانتی‌گراد ساییده شد. محلول حاصل پس از سانتریفیوژ به مدت ۲۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ g و دمای چهار درجه سانتی‌گراد برای سنجش غلظت پروتئین محلول، با افزودن عصاره پروتئینی و

خاک اضافه شد و در مورد تیمار محلول‌پاشی، بدون اضافه کردن کود سکوسترین آهن به خاک، بعد از کشت گیاه از روش محلول‌پاشی برگ (سه نوبت در ۲۱، ۲۸ و ۳۵ روز بعد از کشت گیاه، هر بار به میزان ۱۰۰ میلی‌لیتر) استفاده شد.

کاشت بذر و نگهداری گیاهان

بذرهای یونجه یک‌ساله (اسکوتالاتا) بعد از استریل شدن در سطح خاک در گلدان‌های چهار کیلوگرمی کاشته شدند. بعد از اتمام کامل جوانه زنی بذر (هفت روز)، تعداد گیاهچه‌ها در هر گلدان به ۲۰ عدد رسانده شد و تا اتمام زمان آزمایش (۴۶ روز بعد از کاشت بذر) کلیه گلدان‌ها در حد رطوبت زراعی با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای اتوماتیک (دستگاه تایمر ۲۴ ساعته) آبیاری شدند. یک روز قبل از پایان آزمایش نمونه‌برداری از گیاهان برای اندازه‌گیری پارامترهای کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ (RWC)، شاخص پایداری غشا (MSI) و آهن فعال انجام شد.

برداشت گیاه و اندازه‌گیری غلظت آهن

در پایان دوره آزمایش از هر گلدان ۱۰ گیاه به‌طور تصادفی انتخاب و بلافاصله در فریزر در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد برای انجام آزمایش‌های بعدی (پروتئین، ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی کل) نگهداری شد. بقیه گیاهان نیز بعد از تفکیک ریشه و برگ و اندازه‌گیری وزن تازه اندام‌ها، برای خشک‌شدن به آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت منتقل شدند. پس از آماده‌سازی و هضم مرطوب نمونه‌ها، غلظت آهن در ریشه و برگ گیاه یونجه یک‌ساله با استفاده از دستگاه

نانومتر اندازه گیری شد. نتایج به صورت میلی گرم معادل روتین (RuE) در هر گرم وزن خشک با استفاده از منحنی کالیبراسیون روتین ($R^2=0/997$) بیان شد.

تجزیه و تحلیل داده ها

تجزیه داده ها با استفاده از نرم افزار آماری SPSS 13.0 ارزیابی شد. مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد و رسم نمودارها نیز توسط نرم افزار Sigma Plot 11 صورت گرفت و برای ارزیابی روابط بین مقادیر کلروفیل برگ و غلظت آهن فعال و ترکیبات فنولیک برگ (شکل ۴ و ۷) مدل Least-squares fit linear models با معنی داری همبستگی در سطح ۰/۰۱ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که برهم کنش تیمار آهن و آهک بر وزن خشک ساقه، ریشه و همچنین نسبت وزن تازه ریشه به وزن خشک برگ در سطح ۰/۰۱ معنی دار بود (جدول ۲). با افزایش غلظت آهک از صفر تا هشت درصد وزن خشک ساقه و ریشه در تیمار Control-S با شیب بیشتری نسبت به تغییرات آن در تیمارهای Fe ۵ و Fe ۱۰ کاهش یافته است. بیشترین و کمترین وزن خشک ساقه و ریشه در تیمار محلول پاشی آهن به ترتیب در سطح آهک صفر و هشت درصد مشاهده شد؛ با افزایش غلظت آهک در خاک، وزن خشک ساقه و ریشه به طور معنی داری کاهش یافتند. نتایج مربوط به نسبت وزن تازه ریشه به وزن خشک برگ نشان داد که با افزایش سطح آهک از صفر به چهار درصد در خاک، این نسبت در کلیه تیمارها روندی افزایشی داشته است. افزایش این نسبت عمده تاً مربوط به کاهش بیشتر زیست توده اندام هوایی نسبت به ریشه در شرایط تنش کمبود آهن است. نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر ساده تیمار آهن و آهک بر وزن تازه و خشک برگ در سطح پنج درصد معنی دار بود (جدول ۲). بیشترین وزن تازه و خشک برگ در تیمار محلول پاشی آهن

معرف بیوره استفاده و پس از دو دقیقه، جذب محلول با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر خوانده شد (۶).

آهن فعال (آهن عصاره گیری شده با ۱۰،۱ فنانترولین):

آهن فعال در بافت تازه برگ گیاه یونجه یک ساله به روش کاتیال و شارما (۲۰) اندازه گیری شد. در این روش از ۱۰،۱ فنانترولین برای استخراج آهن به عنوان معرف در محلول استخراج شده از بافت گیاهی استفاده شد و سپس مقدار تثبیت شده آهن فعال در محلول حاصل با دستگاه جذب اتمی قرائت شد.

اندازه گیری محتوای ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی کل

استخراج ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی بر اساس روش آلوارز پارایلا و همکاران با برخی اصلاحات انجام شد (۴). حدود ۲۰۰ میلی گرم برگ تازه پودر شده در نیتروژن مایع با محلول ۸۰ درصد متانول مخلوط شد، سپس محلول حاصل پس از شیک و سانتریفیوژ ۱۲۰۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه در چهار درجه سانتی گراد جمع آوری شد. حلال با استفاده از فریز درایر (Freeze Drier, FD-۴) برای ۷۲ ساعت در دمای ۵۰- درجه سانتی گراد خشک و از عصاره خشک شده حاصل برای اندازه گیری محتوای کل فنولیک و فلاونوئیدها استفاده شد. اندازه گیری ترکیبات فنولی کل با روش فولین شیکالتو با کمی اصلاحات انجام شد (۲۷). عصاره خشک شده در مرحله قبل در متانول ۸۰ درصد حل سپس ۵۰۰ میکرولیتر از محلول حاصل با ۲/۵ میلی لیتر از معرف فولین شیکالتو ۱۰ درصد (v/v) مخلوط و پس از اضافه کردن کربنات سدیم، جذب در نمونه ها با استفاده از اسپکتروفتومتر در ۷۵۰ نانومتر اندازه گیری شد. ترکیبات فنولی به صورت میلی گرم معادل گالیک اسید (GAE) بر گرم وزن خشک برگ بیان شد. محتوای فلاونوئیدی نیز با استفاده از آزمون رنگ سنجی با توجه روش منی چینی و همکاران با کمی تغییرات جزئی، تعیین شد (۲۸). ۰/۵ میلی لیتر از عصاره متانولی با آب مقطر دیونیزه و نیتريت سدیم پنج درصد مخلوط و پس از افزودن آلومینیوم کلراید ۱۰ درصد و هیدروکسید سدیم ۰/۵ مولار، جذب محلول حاصل در ۴۲۵

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثرهای اصلی و برهم‌کنش فاکتورها بر وزن تازه و خشک اندام‌های گیاه

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | | | |
|-------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | | وزن تازه ریشه | وزن تازه برگ | وزن تازه ساقه | وزن خشک ریشه | وزن خشک برگ | وزن خشک ساقه |
| سطح آهن | ۴ | ۰/۲۹ ^{ns} | ۰/۹۵* | ۰/۰۹ ^{ns} | ۰/۰۳** | ۰/۰۸** | ۰/۰۰۲** |
| سطح آهک | ۲ | ۱/۷۵** | ۸/۵۷** | ۰/۸۳* | ۰/۲۱** | ۰/۶۶** | ۰/۰۱** |
| سطح آهن × سطح آهک | ۸ | ۰/۲۱ ^{ns} | ۰/۳۲ ^{ns} | ۰/۰۳ ^{ns} | ۰/۰۳** | ۰/۰۲ ^{ns} | ۰/۰۰۱** |
| خطا | ۳۰ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۰۰۰۵ |

** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns بدون اختلاف معنی‌دار

ایجاد اختلال در جذب آهن توسط گیاه، موجب ایجاد عدم تعادل در جذب سایر عناصر غذایی شده است و از طرفی به‌علت تأثیر و نقش یون‌های بی‌کربنات در افزایش pH رایزوسفر و تأثیر بر نفوذپذیری غشا موجب کاهش شاخص پایداری غشا و همچنین مقدار RWC می‌شود (۹ و ۲۹). افزایش غلظت کلسیم در خاک به‌واسطه حضور مقادیر زیاد آهک تا حدودی می‌تواند موجب کاهش جذب آهن در گیاه به‌علت وجود رابطه آنتاگونیسمی بین آنها شود، از طرفی جذب زیاد کلسیم توسط ریشه ممکن است موجب برهم زدن تعادل یونی و دفع پروتون‌ها شود که نتیجه آن رسوب آهن در آپوپلاست ریشه خواهد بود (۱). افزایش نسبت وزن ریشه به اندام هوایی در گیاهان در شرایط کمبود آهن با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت داشت (۱۶ و ۴۳). افزایش این نسبت یکی از مکانیسم‌های گیاه در شرایط کمبود آهن محسوب می‌شود که با افزایش تعداد ریشه‌های ثانویه و تمایز سلول‌ها در مریستم ریشه همراه است (۲۹). در مقایسه با این نتایج، گونه‌های دیگر مانند چغندر قند در شرایط کمبود آهن محدودیت رشد بیشتری را در ریشه‌ها نسبت به اندام هوایی نشان دادند (۳۶).

نتایج مربوط به غلظت کلروفیل در برگ‌های گیاه یونجه یک‌ساله نشان داد که هیچ اثری از زردبرگی در تیمار کمبود مستقیم آهن (Control-S Lime) مشاهده نشد در حالی که در تیمار کمبود غیر مستقیم آهن (Control-S Lime₈) علائم زردبرگی به وضوح مشاهده شد (شکل ۱). با افزایش

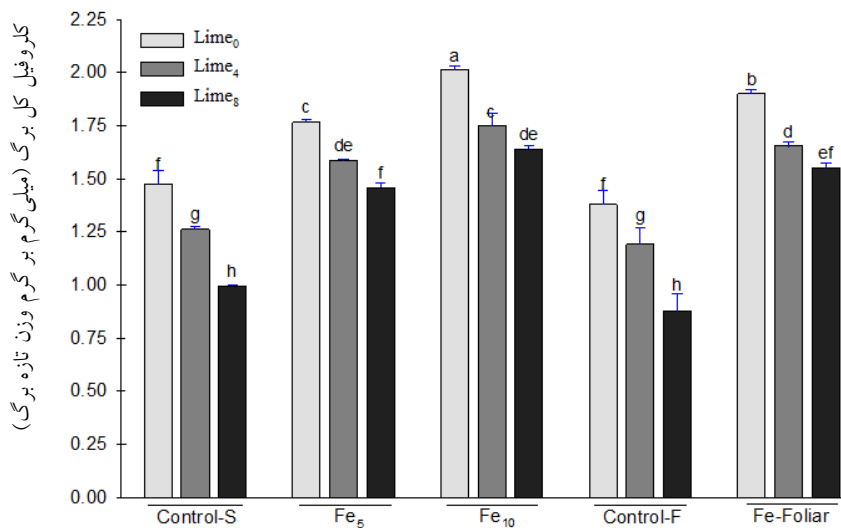
(Fe-Foliar) و تیمار مصرف خاکی آهن (۱۰ Fe) مشاهده شد. با افزایش غلظت آهک از صفر تا هشت درصد در تیمارهای Fe ۵ و ۱۰ Fe نسبت ریشه به برگ افزایش یافت اما در تیمار محلول‌پاشی آهن (Fe-Foliar)، این نسبت به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که بیانگر این مطلب است که چون محلول‌پاشی آهن نسبت به تیمار کنترل موجب افزایش معنی‌داری در وزن تر و خشک برگ شده است به همین دلیل در این تیمار با افزایش غلظت آهک در خاک وزن تر ریشه بیشتر از وزن خشک برگ کاهش یافته است. مقایسه میانگین‌های اثر ساده سطوح آهک بر وزن خشک برگ، وزن تازه ساقه، برگ و ریشه نشان داد که افزایش غلظت آهک تا هشت درصد موجب کاهش معنی‌داری در وزن اندام‌های گیاهی شده است و وزن برگ بیشتر از وزن سایر اندام‌ها تحت تأثیر غلظت زیاد آهک در خاک قرار گرفته است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش تیمار آهن و آهک بر RWC و MSI در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۳). افزایش غلظت آهک موجب کاهش شدیدی در RWC و MSI شد که یکی از دلایل آن می‌تواند مربوط به تأثیر غلظت‌های زیاد آهک در خاک روی افزایش اثر تنش اسمزی و همچنین یونی در گیاه باشد (۳۱). به عبارتی با افزایش غلظت آهک در خاک فراهمی و قابلیت استفاده آب در خاک برای گیاه کاهش یافته است که با افزایش نسبت وزن ریشه به برگ همراه بود. افزایش غلظت آهک از یک طرف با

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثرهای اصلی و برهم کنش تیمارها بر پارامترهای فیزیولوژیکی و غلظت و جذب آهن در گیاه یونجه یک ساله

| میانگین مربعات | | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------|------------------|--------------------|---------|------------|--------------------|
| جذب آهن ریشه | جذب آهن فعال برگ | جذب آهن برگ | غلظت آهن ریشه | شاخص پایداری غشا | محتوای نسبی آب برگ | کلروفیل | | |
| ۱۱۰۳۸۷۱/۴۴** | ۱۵۰۴/۶۸** | ۲۳۴۸۵/۰۵** | ۲۴۶۹۶۳۴/۴۵** | ۲۶۳/۸۳** | ۲۹۰/۵۲** | ۰/۶۱** | ۴ | سطح آهن |
| ۶۹۰۴/۰۱ ^{ns} | ۵۰۳۶/۱۵** | ۵۵۴۹۵/۵۱** | ۳۴۴۷۱۱/۴۱** | ۲۵۲۹/۰۵** | ۲۷۴۵/۱۵** | ۰/۵۹** | ۲ | سطح آهنک |
| ۲۳۵۱۹۴/۸۹** | ۴۴/۸۹ ^{ns} | ۹۶۸/۶۷ ^{ns} | ۳۳۳۶۰۰/۱۷** | ۲۷/۸۹** | ۲۹/۷۹** | ۰/۰۱* | ۸ | سطح آهن × سطح آهنک |
| ۴۱۵۲/۴۶ | ۳۱/۴۹ | ۴۳۹/۵۸ | ۳۳۵۳/۳۴ | ۷/۱۵ | ۸/۳۲ | ۰/۰۱ | ۳۰ | خطا |

** و * به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns بدون اختلاف معنی دار



شکل ۱. برهم کنش مصرف آهن (خاکی و محلول پاشی) و سطوح آهنک بر غلظت کلروفیل برگ. حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد بین تیمارها است.

همکاران مبنی بر تأثیر محلول پاشی کلات آهن (III) بر افزایش غلظت کلروفیل و آهن برگ مطابقت داشت (۱ و ۳). همچنین نتایج مطالعات قبلی نشان داد که محلول پاشی محلول‌های حاوی آهن همواره منجر به افزایش کلروفیل برگ شد به طوری که درصد افزایش آن تابع نوع منبع آهن مورد استفاده بود (۱۱). همچنین این پژوهشگران اعلام کردند که برگ پاشی آهن روی درختان گلابی در شرایط خاک‌های آهنکی باعث بهبود غلظت کلروفیل در برگ شد (۱۱ و ۱۷).

نتایج واریانس داده‌ها نشان داد که برهم کنش تیمار آهن و

غلظت آهنک، مقدار کلروفیل در برگ گیاهان به طور معنی داری کاهش یافت، در سطح صفر و چهار درصد آهنک، بیشترین مقدار کلروفیل در تیمار Fe ۱۰ مصرف خاکی کود سکوسترین آهن مشاهده شد در حالی که در سطوح هشت درصد آهنک، بین دو تیمار Fe ۱۰ مصرف خاکی آهن و تیمار محلول پاشی (Fe-Foliar) تفاوت معنی داری مشاهده نشد. محلول پاشی آهن موجب افزایش معنی داری در غلظت کلروفیل در هر سه سطح آهنک نسبت به تیمار کنترل شد (شکل ۱). این نتایج با گزارش‌های آبادیا و همکاران و آلوارز فرناندز و

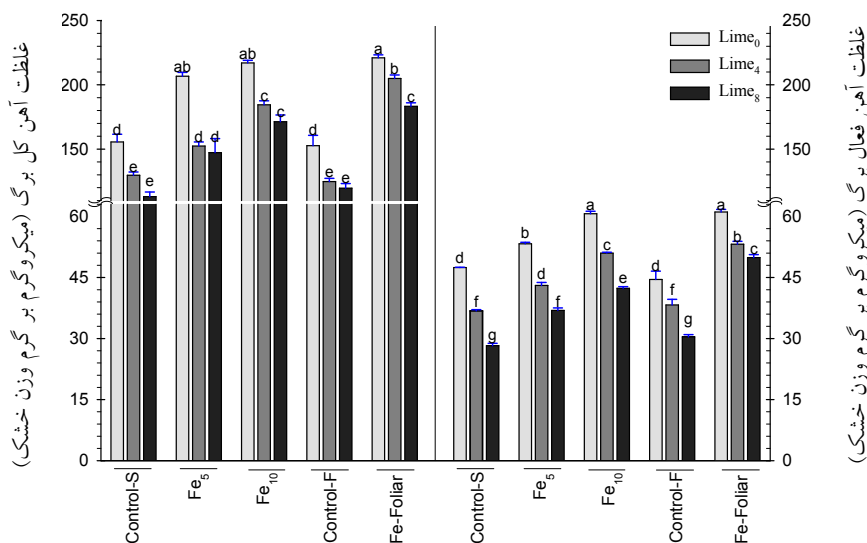
آهک بر غلظت آهن کل و فعال (Fe^{2+}) برگ‌ها به ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مصرف خاکی آهن (۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، در سطح صفر درصد آهک موجب افزایش معنی‌داری در غلظت آهن در برگ‌های گیاه نسبت به تیمار کنترل خاکی (Control-S) شد، این در حالی است که در سطوح چهار و هشت درصد آهک در خاک، مصرف خاکی آهن با نرخ کمتری غلظت آهن در برگ‌ها را افزایش داده است (شکل ۲). محلول‌پاشی آهن نیز در هر سه سطح آهک باعث افزایش معنی‌داری در غلظت آهن برگ نسبت به تیمار کنترل محلول‌پاشی (Control-F) شد (شکل ۲)؛ به طوری که بیشترین غلظت آهن در برگ و در هر سه سطح آهک در تیمار محلول‌پاشی آهن مشاهده شد. نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌های برهم‌کنش مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن و سطوح آهک بر غلظت آهن فعال در برگ‌ها نشان داد که با افزایش غلظت آهک در خاک، در کلیه تیمارها، غلظت آهن دوظرفیتی در برگ گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۲). مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن موجب افزایش معنی‌داری در غلظت آهن فعال برگ‌ها نسبت به تیمار کنترل در سه سطح آهک شد. محلول‌پاشی آهن موجب شد که غلظت آهن فعال در برگ‌ها با افزایش سطح آهک در خاک با شیب کمتری کاهش یابد به عبارتی غلظت آهن فعال در سطح هشت درصد آهک در خاک در تیمار محلول‌پاشی بیشتر از تیمار $Fe\ 5$ و $Fe\ 10$ بوده است (شکل ۲). همان طور که اشاره شد زردبرگی تنها در تیمار کنترل با هشت درصد آهک ($Control-S\ Lime_8$) مشاهده شد (شکل ۱)، اگرچه بین غلظت آهن کل برگ‌ها در تیمار کنترل بین دو سطح چهار و هشت درصد آهک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲) اما چون غلظت آهن فعال در سطح آهک چهار درصد به طور معنی‌داری بیشتر از سطح آهک هشت درصد بود (شکل ۲)، در نتیجه علائم کلروز برگگی در تیمار $Control-S\ Lime_4$ مشاهده نشد. غلظت آهن در برگ گیاه یونجه یک‌ساله بین دو سطح چهار و هشت درصد آهک در دو سطح مصرف خاکی آهن تفاوت معنی‌داری نداشت در حالی که میزان جذب آهن برگ با افزایش غلظت

آهک از چهار به هشت درصد به طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۲) که علت آن اثر رقت و تأثیر غلظت بی‌کربنات حاصل از آهک در کاهش وزن خشک برگ است که نتیجه آن کاهش جذب آهن در سطوح بالای آهک در خاک است (۲۹). نتایج واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش تیمار آهن و آهک بر غلظت و جذب آهن ریشه گیاه یونجه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). میزان انتقال آهن از ریشه به برگ، در دو تیمار مصرف خاکی آهن (۵ و ۱۰ میلی‌گرم آهن در خاک) با افزایش غلظت آهک (از صفر تا هشت درصد) کاهش یافت، در صورتی که در تیمار کنترل (تیمار بدون آهن) افزایش غلظت آهک اثر افزایشی روی درصد انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی داشته است (شکل ۲ و ۳). در تیمار ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، درصد انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی از ۲۰ درصد (سطح صفر درصد آهک) به هفت درصد (بالترین سطح آهک) کاهش یافت. مطالعات انجام‌شده روی گیاه یونجه یک‌ساله نشان داد که پاسخ ریشه گیاه به کمبود مستقیم و غیرمستقیم آهن متفاوت است و در شرایط کمبود آهن در حضور آهک، تراوش ترکیبات فلاونوئیدی به خارج از ریشه نسبت به شرایط کمبود مستقیم آهن کاهش یافت که نتیجه آن کاهش غلظت کلروفیل و آهن برگ در شرایط حضور آهک، به دلیل عدم انتقال مناسب آهن از ریشه به برگ، بوده است (۳۳ و ۳۵). این نتایج همچنین مطابق نتایج چپی و همکاران است (۹). آنها گزارش کردند که در گیاه کاهو به‌عنوان یک گیاه استراتژی I در جذب آهن، حضور یون‌های بی‌کربنات موجب کاهش معنی‌داری در انتقال آهن از ریشه به برگ شده است. در تیمار کنترل درصد انتقال آهن از ریشه به برگ در سطح آهک صفر، چهار و هشت درصد به ترتیب ۲۱، ۲۸ و ۲۵ درصد بوده است که علت آن می‌تواند مربوط به پاسخ‌های متابولیکی گیاه در شرایط کمبود آهن باشد. همان‌طور که مطالعات بسیاری نشان داده است که گیاهان آهن‌کارا در شرایط کمبود آهن از مکانیسم‌هایی متفاوتی (کاهش اسیدیته رایزوسفر، تراوش‌های ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی و اسیدهای آلی) برای افزایش جذب آهن توسط ریشه از محیط رشد و به‌دنبال آن افزایش

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثرهای اصلی و برهم کنش تیمارها بر برخی پارامترهای بیوشیمیایی و غلظت آهن برگ در گیاه یونجه یک ساله

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|-------------------|------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|
| | | پروتئین | غلظت آهن برگ | غلظت آهن فعال برگ | فلاونوئید کل برگ |
| سطح آهن | ۴ | ۸۷/۶۹** | ۱۰۳۴۸/۱۱** | ۶۲۱/۸۶** | ۲۷/۹۷** |
| سطح آهک | ۲ | ۵۹۹/۶۵** | ۷۴۶۹/۵۱** | ۹۴۳/۷۳** | ۴۲/۶۳** |
| سطح آهن × سطح آهک | ۸ | ۴۷/۲۷* | ۱۶۹/۲۸** | ۷/۹۷** | ۴/۶۰** |
| خطا | ۳۰ | ۱/۵۹ | ۷۲/۷۵ | ۰/۷۷ | ۰/۰۷ |

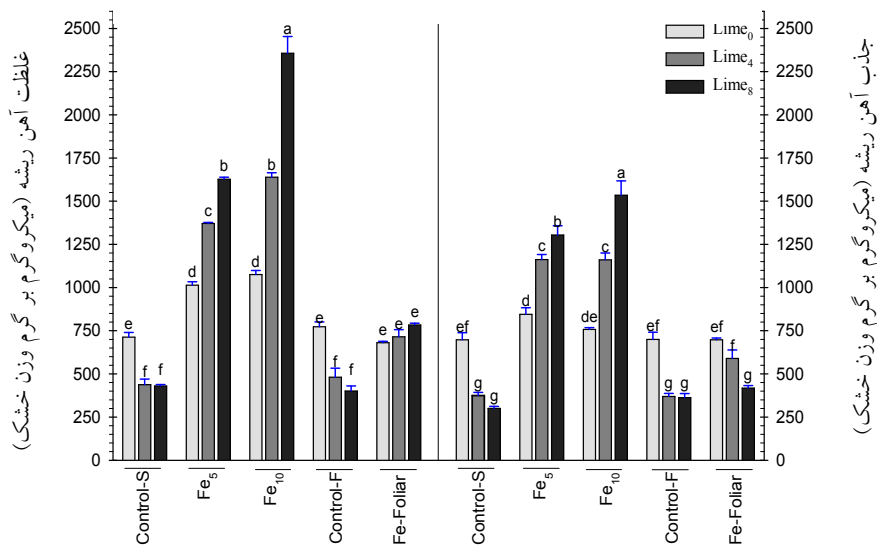
** و * به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns بدون اختلاف معنی دار



شکل ۲. برهم کنش مصرف آهن (خاکی و محلول پاشی) و سطوح آهک بر غلظت آهن کل و آهن فعال در برگ گیاه یونجه یک ساله. حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد بین تیمارها است.

مصرف خاکی آهن مشاهده شد. نتایج حاصل از این پژوهش هم‌راستا با مطالعات آبادیا و همکاران بود، آنها نشان دادند که غلظت آهن در ریشه گیاهان رشد یافته (گیاهان استراتژی I) در خاک‌های آهکی حتی ممکن است بیشتر از سایر گیاهان رشد یافته در خاک‌های غیر آهکی باشد، به این مفهوم که در حضور آهک، آهن توسط ریشه جذب شده اما به علت رسوب و غیر متحرک شدن آهن در آپوپلاست ریشه و یا حتی آپوپلاست برگ توانایی شرکت در فعالیت‌های متابولیکی گیاه را ندارد و در نتیجه علائم زردبریگی با وجود غلظت‌های زیاد آهن در برگ بروز می‌کند. همچنین مطالعات پژوهشگران نشان داد که غلظت آهن فعال (قابل استخراج) و همچنین جذب آهن کل در

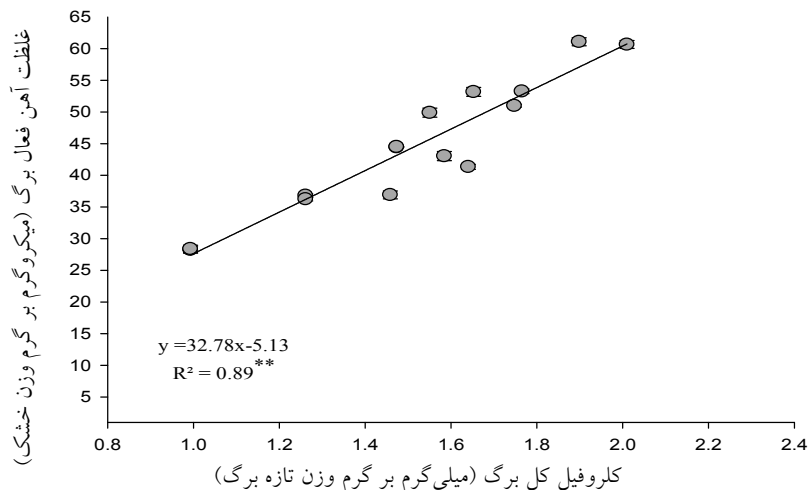
انتقال آهن جذب شده از ریشه به برگ استفاده می‌کنند (۱۴) و (۲۵). در تیمار کنترل، افزایش غلظت آهک در خاک از چهار به هشت درصد، اثر معنی داری روی غلظت آهن ریشه گیاه یونجه نداشته است (شکل ۳). در حالی که در هر دو سطح مصرف خاکی آهن (۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، با افزایش غلظت آهک تا هشت درصد، موجب افزایش معنی داری در غلظت آهن در ریشه شد. در تیمار محلول پاشی آهن نیز بین سه سطح غلظت آهک تفاوت معنی داری در غلظت آهن ریشه مشاهده نشد که منطبق با نتایج آلوارز-فرناندز و همکاران مبنی بر کارایی کم انتقال آهن از برگ به ریشه در روش محلول پاشی است (۳). بیشترین غلظت آهن در ریشه در تیمار Fe ۱۰



شکل ۳. برهم کنش مصرف آهن (خاکی و محلول پاشی) و سطوح آهک بر غلظت و جذب آهن ریشه گیاه یونجه یک‌ساله. حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها است.

از آهن کل کاهش یافت. همچنین جذب آهن کل و فعال، با افزایش غلظت آهک در خاک به طور معنی‌داری کاهش یافت. به طوری که اختلاف کاهش در میزان جذب بین دو سطح صفر و چهار درصد آهک به مراتب بیشتر از اختلاف کاهش بین دو سطح چهار و هشت درصد آهک بود. بین غلظت آهن فعال (Fe^{2+}) در برگ‌ها و میزان کلروفیل همبستگی مثبتی ($R^2=0/89$) مشاهده شد (شکل ۴) که مشابه این نتایج توسط سایر مطالعات نیز گزارش شده است (۱) گیاهان زمانی که با کمبود آهن مواجه می‌شوند در معرض مشکلات مربوط به عدم تعادل انرژی قرار می‌گیرند. در این شرایط با کمبود آهن درخواست انرژی و نیروی احیاکنندگی، به دلیل فعال‌سازی خروج پروتون و احیای آهن (III) و از سوی دیگر از کار افتادن فعالیت میتوکندریایی بیشتر می‌شود (۳۹). در حقیقت، از یک‌سو میتوکندری‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین قربانیان کمبود آهن شناخته شده‌اند و از سوی دیگر بیوسنتز کلروفیل به‌شدت کاهش می‌یابد (۸ و ۴۱) که بیانگر همبستگی مثبت بین غلظت آهن فعال (Fe^{2+}) و میزان کلروفیل در برگ‌ها است. با توجه به همبستگی مثبت و قوی بین غلظت آهن فعال و کلروفیل برگ

برگ‌های گیاهان در شرایط IDC به مراتب کمتر از گیاهان رشد یافته در شرایط خاک‌های طبیعی است که این پدیده حاکی از انتقال ضعیف و ناکارآمد آهن از ریشه به اندام هوایی در این شرایط است، همچنین سایر پژوهشگران گزارش کردند که یکی از مکانیسم‌های بی‌کربنات در کاهش جذب آهن در گیاه و ایجاد زردبرگی، مربوط به اثر این یون در غیرمتحرک‌سازی آهن در آپوپلاست ریشه است (۲۱، ۲۲ و ۲۶). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن و سطوح آهک بر جذب آهن کل و فعال برگ‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)؛ جذب آهن کل و فعال در برگ گیاه دارای الگوی مشابهی بود و بیشترین جذب آهن کل و فعال در برگ‌ها در تیمار محلول‌پاشی آهن به‌ترتیب ۲۴۱/۷ و ۲۹/۶۵ میکروگرم بر گیاه و کمترین جذب آهن کل و فعال در تیمار کنترل به‌ترتیب با ۱۲۹/۱۸ و ۳۶/۶۷ میکروگرم بر گیاه مشاهده شد. این در حالی است که آهن فعال در تیمار کنترل با ۲۸/۳ درصد از آهن کل در برگ، بیشترین درصد آهن فعال از کل را در بین کلیه تیمارها شامل شد. با افزایش غلظت آهن از صفر به ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک درصد آهن فعال



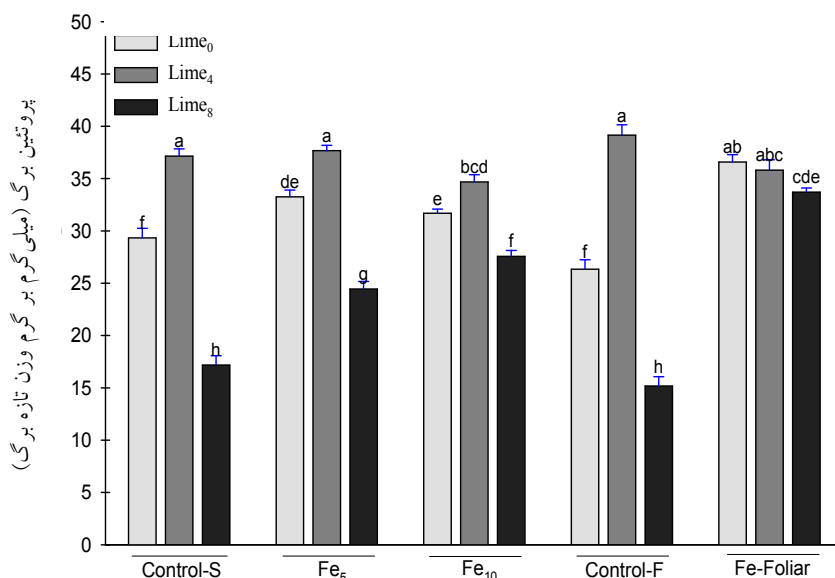
شکل ۴. همبستگی بین غلظت آهن فعال و میزان کلروفیل در برگ گیاه یونجه یک ساله

سطح آهک در خاک، تفاوت چشمگیری مشاهده نشد. در دو سطح صفر و هشت درصد آهک غلظت پروتئین در این تیمار نسبت به تیمار کنترل به طور معنی داری افزایش یافت. یکی از دلایل افزایش غلظت پروتئین در مراحل اولیه تنش و سپس کاهش آن با تشدید تنش، افزایش تولید ترکیبات فنولی و دفع رادیکال‌های آزاد برای افزایش مقاومت گیاه به کمبود آهن ناشی از حضور آهک در خاک است. (۱۶).

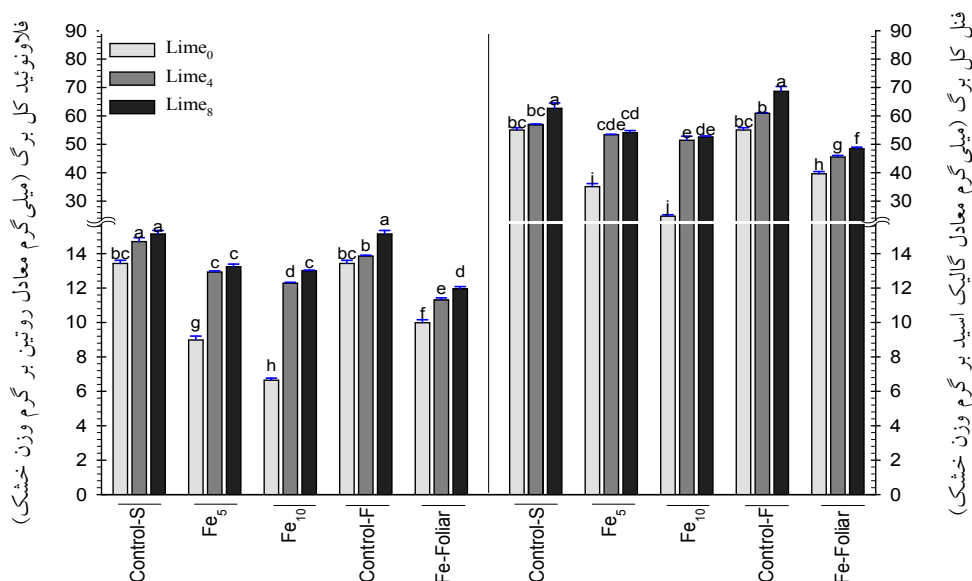
نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش مصرف خاکی و محلول پاشی آهن و سطوح آهک بر غلظت فنول و فلاونوئیدهای کل در برگ گیاه نشان داد که غلظت فنول کل در برگ‌های گیاه بیشتر از غلظت فلاونوئیدهای کل است (شکل ۵). غلظت این ترکیبات در برگ گیاه با مصرف خاکی آهن (۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در هر سه سطح آهک به طور معنی داری نسبت به تیمار کنترل کاهش یافت. در هر سه سطح مصرف خاکی آهن (۰، ۵، ۱۰ Fe) غلظت فلاونوئید و فنول کل، با افزایش غلظت آهک در خاک از صفر تا هشت درصد به طور معنی داری افزایش یافت به گونه‌ای که نرخ افزایش غلظت این ترکیبات آنتی‌اکسیدانی بین دو سطح صفر و چهار درصد آهک در هر یک از تیمارها بیش از دو سطح چهار و هشت درصد آهک بوده است (شکل ۶). محلول پاشی آهن نیز به طور معنی داری باعث کاهش غلظت فنول و فلاونوئید کل

می‌توان نتیجه گرفت که غلظت آهن فعال در برگ‌ها می‌تواند شاخص بهتری برای بررسی زردبرگی در گیاه باشد. همان‌طور که نتایج نشان داد در برخی از تیمارها با غلظت‌های برابر آهن در برگ نتایج متفاوتی از غلظت کلروفیل و علائم زردبرگی مشاهده شد که تنها بخشی از آن مربوط به اثر رقت بود و علت اصلی آن وجود تفاوت‌های چشمگیر در غلظت‌های آهن فعال در برگ گیاه بوده است (پدیده پارادوکس آهن کلروزین) که به اختلال فیزیولوژیکی کمبود آهن در گیاه اشاره دارد (۱).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش تیمار آهن و آهک بر غلظت پروتئین برگ‌ها، فنول و فلاونوئیدهای کل در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). مصرف خاکی کود سکوسترین آهن در دو سطح ۵ و ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی داری در غلظت پروتئین برگ‌ها در دو سطح آهک صفر و هشت درصد نسبت به تیمار کنترل شد (شکل ۵). افزایش غلظت آهک در خاک از صفر تا چهار درصد، در تیمارهای ۰، ۵، ۱۰ Fe موجب افزایش معنی داری در غلظت پروتئین برگ‌ها شد که یکی از دلایل آن می‌تواند افزایش تولید پروتئین‌های تنشی در گیاه باشد (۸) در حالی که غلظت پروتئین در این تیمارها با افزایش مقدار آهک از چهار تا هشت درصد، به طور معنی داری کاهش یافت. بین غلظت پروتئین در برگ‌ها در تیمار محلول پاشی آهن در سه



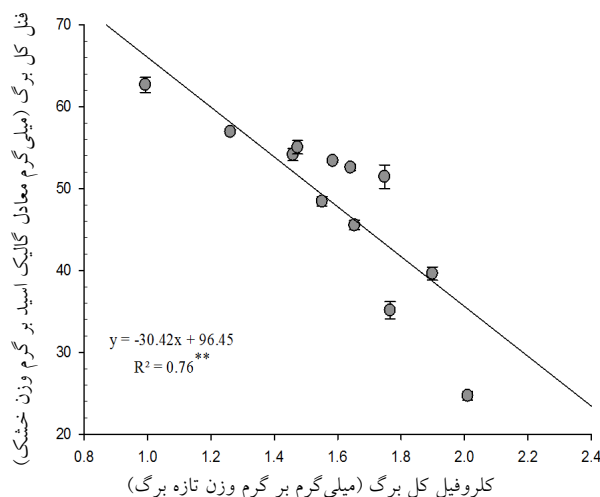
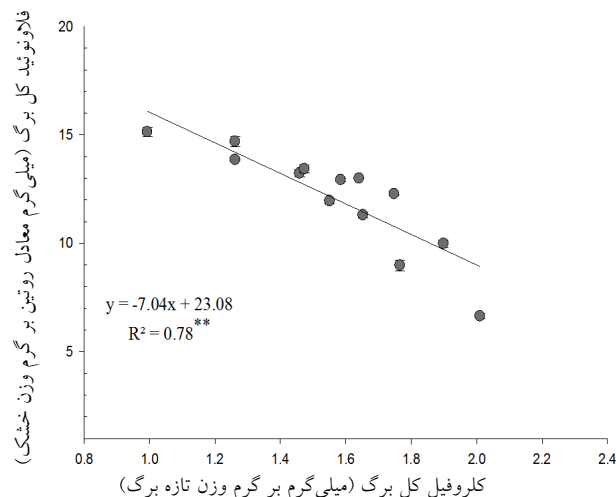
شکل ۵. برهم‌کنش مصرف آهن (خاکی و محلول‌پاشی) و سطوح آهک بر غلظت پروتئین در برگ یونجه یک‌ساله. حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها است.



شکل ۶. برهم‌کنش مصرف آهن (خاکی و محلول‌پاشی) و سطوح آهک بر غلظت فنول و فلاونوئیدهای کل در برگ گیاه. حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها است.

بر کیلوگرم خاک (Fe ۵ و Fe ۱۰) مشاهده شد و کمترین غلظت فلاونوئید و فنول کل در برگ‌های گیاه یونجه در سطوح صفر و هشت درصد آهک به‌ترتیب در تیمار ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک (Fe ۱۰) و محلول‌پاشی آهن مشاهده شد.

در هر سه سطح آهک نسبت به تیمار کنترل شد. در بین دو سطح مصرف خاکی و محلول‌پاشی آهن، بیشترین غلظت فلاونوئید و فنول کل در برگ‌های گیاه در سطح آهک صفر و هشت درصد به‌ترتیب در تیمار محلول‌پاشی آهن و تیمار ۵ و ۱۰ میلی‌گرم آهن



شکل ۷. همبستگی بین غلظت ترکیبات فلاونوئیدی و فنولی و میزان کلروفیل در برگ گیاه

علائم زردبرگی و با کمترین غلظت کلروفیل دارای بیشترین غلظت ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی بوده است. افزایش غلظت ترکیبات فنولیک (فنولی و فلاونوئیدی) در گیاه مثال خوبی از انعطاف پذیری متابولیکی است چرا که گیاهان می‌توانند با القای بیوسنتز این مواد در مسیرهای دوطرفه مختلف، به سرعت به تنش‌های محیطی و تغذیه‌ای پاسخ دهند (۱۳ و ۲۳).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد، پاسخ گیاه یونجه یک‌ساله (اسکوتالاتا) به کمبود آهن همراه با تنش قلیائیت (کمبود غیر مستقیم آهن)، متفاوت از کمبود مستقیم آهن بود. گیاه تنها در شرایط کمبود غیرمستقیم آهن (IDC) علائم زردبرگی را نشان داد که باعث ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه شد، به عبارتی مکانیسم پاسخ گیاه یونجه یک‌ساله به زردی ناشی از آهک با کاهش شاخص پایداری غشا، محتوای نسبی آب برگ، غلظت پروتئین و افزایش غلظت ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی در برگ گیاه نسبت به شرایط کمبود مستقیم آهن همراه بود که نتیجه آن کاهش غلظت آهن فعال و کلروفیل در برگ گیاه بوده است. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از روش محلول پاشی برگی Fe-EDDHA در خاک‌های آهکی برای کاهش اثرات زردبرگی ناشی از آهک توصیه می‌شود. این روش با افزایش

نتایج هسی و واترز نشان داد که در شرایط IDC میزان بیان ژن‌های سنتز ریپوفلاوین در خیار افزایش یافت (۱۹) نتایج این پژوهشگران همچنین نشان داد که اگرچه بین کمبود آهن در pH نرمال و کمبود آهن در شرایط قلیائیت مسیره‌های بیان ژن مشترکی وجود دارد و با یکدیگر هم‌پوشانی دارند اما این دو کاملاً مشابه یکدیگر نیستند. مطالعات متابولومیکس اخیر نشان داده است که در شرایط کمبود آهن و قلیائیت تغییرات متابولیکی ریشه گیاه متفاوت است (۳۸). مطالعات نشان داد که در شرایط کمبود آهن در ریشه گیاه یونجه یک‌ساله چندین ژن و پروتئین در مسیر سنتز ریپوفلاوین بیان می‌شود (۳۳، ۳۴ و ۳۵) نتایج نشان داد در این گیاه در شرایط کمبود آهن همراه با تنش قلیائیت، اگرچه غلظت فلاوین‌ها در ریشه گیاه افزایش یافت اما تنها فراوانی برخی از پروتئین‌های مسئول سنتز ریپوفلاوین در ریشه گیاه نسبت به شرایط کمبود آهن در pH نرمال افزایش یافت (۳۳). این در حالی است که در شرایط کمبود آهن همراه با تنش قلیائیت تراوش ترکیبات فلاوینی از ریشه گیاهان نسبت به کمبود آهن کاهش یافت (۳۵). نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که بین غلظت کلروفیل و ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی در برگ گیاه همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت (شکل ۷).

این نتایج نشان داد که تیمار کنترل (Control-S Lime) با

MSI، RWC پروتئین و کاهش غلظت ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی برگ نسبت به تیمار کنترل و مصرف حاکی آهن در سطوح چهار و هشت درصد آهنک، از یکسو موجب افزایش قابلیت زیستی و جذب آهن کل و فعال در گیاه شد و از سوی دیگر با افزایش غلظت پروتئین و کاهش غلظت ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی موجب خوش خوراکی و افزایش ارزش غذایی یونجه یکساله در شرایط کمبود آهن ناشی از حضور آهنک در خاک شد.

منابع مورد استفاده

1. Abadía, J., S. Vázquez, R. Rellán-Álvarez, H. El-Jendoubi, A. Abadía, A. Álvarez-Fernández and A-F. López-Millán. 2011. Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis. *Plant Physiology and Biochemistry* 49: 471–482.
2. Alford, C. M., J. M. Krall and S. D. Miller. 2003. Intercropping irrigated corn with annual legumes for fall forage in the high plains. *Agronomy Journal* 95:520–525.
3. Álvarez-Fernández, A., S. García-Marco and J. J. Lucena. 2005. Evaluation of synthetic iron (III)-chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to correct iron chlorosis. *European Journal of Agronomy* 22:119–130.
4. Alvarez-Parrilla, E., L. A. De La Rosa, R. Amarowicz and F. Shahidi. 2011. Antioxidant activity of fresh and processed jalapeño and serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:163–173.
5. Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: phenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24:1–15.
6. Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72:248–254.
7. Briat, J. F., C. Curie and F. Gaymard. 2007. Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology* 10:276–282.
8. Castagna, A., S. Donnini, and A. Ranieri. 2009. Adaptation to iron-deficiency requires remodelling of plant metabolism: An insight in chloroplast biochemistry and functionality. pp. 205-212, *In: Ashraf, M., M. Ozturk, H. Athar (Eds.), Salinity and Water Stress. Tasks for Vegetation Sciences*, vol 44. Springer, Dordrecht.
9. Chebbi, M., N. Msilini, T. Amdouni and Z. Ouerghi. 2013. Differential responses of two lactuca sativa varieties to bicarbonate-induced iron deficiency. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry* 9: 39–52
10. Chen, H., Z. Hu, X. Li, F. Zhang, J. Chen and M. Zhang. 2016. Iron fertilizers applied to calcareous soil on the growth of peanut in a pot experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62:1753–1764.
11. Chun-xia, L., C. Tie, G. Hai-yan, H. Qing-fang, Z. Yu-zheng and D. Rui-xia. 2017. Effect of foliar ferrous sulphate application on alfalfa (*Medicago sativa* L.) leaf Fe content, photosynthetic capacity and yield. *Nature Environment and Pollution Technology* 15: 765-773.
12. Deshmukh, P., R. Sairam and D. Shukla. 1991. Measurement of ion leakage as a screening technique for drought resistance in wheat genotypes. *Indian Journal of Plant Physiology* 34:89–91.
13. Ferreira, J., M. Cornacchione, X. Liu and D. Suarez. 2015. Nutrient composition, forage parameters, and antioxidant capacity of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to saline irrigation water. *Agriculture* 5:577–597.
14. García-Mina, J. M., E. Bacaicoa, M. Fuentes and E. Casanova. 2013. Fine regulation of leaf iron use efficiency and iron root uptake under limited iron bioavailability. *Plant Science* 198:39–45.
15. Ghanavati, F., H. Mozaffari, A. Masoumi and S. Kazempour. 2007. Morphological studies of pollen grains of *Medicago* species in Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences* 9: 136-145. (In Farsi).
16. Gruber, B and H. Kosegarten. 2002. Depressed growth of non chlorotic vine grown in calcareous soil is an iron deficiency symptom prior to leaf chlorosis. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165:111–117.
17. Hamouda, H. A., M. F. El-Dahshouri, M. O. Hafez and N. G. Zahran. 2015. Response of le conte pear performance, chlorophyll content and active iron to foliar application of different iron sources under the newly reclaimed soil conditions. *International Journal of ChemTech Research* 8:1446-1453
18. Hseu, Z. Y. 2004. Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods. *Bioresource Technology* 5:53–9
19. Hsieh, E. J and B. M. Waters. 2016. Alkaline stress and iron deficiency regulate iron uptake and riboflavin synthesis gene expression differently in root and leaf tissue: Implications for iron deficiency chlorosis. *Journal of Experimental Botany* 67:5671–5685.
20. Katyal, J. C and B. D. Sharma. 1984. Some modification in the assay of Fe²⁺ in 1-10, o-phenanthroline extracts of fresh plant tissues. *Plant and Soil* 79:449–450.
21. Kosegarten, H and H. Koyro. 2001. Apoplastic accumulation of iron in the epidermis of maize (*Zea mays*) roots grown in calcareous soil. *Physiologia Plantarum* 113:515-522

22. Kosegarten, H., B. Hoffmann, E. Rroco, F. Grolig, K. Gluesenkamp and K. Mengel. 2004. Apoplastic pH and FeIII reduction in young sunflower (*Helianthus annuus*) roots. *Physiologia Plantarum* 122:95-106.
23. Kallala, N., M. Wissal, K. Jelali, Z. Kais, H. Mhadhbi. 2018. Inoculation with efficient nitrogen fixing and indoleacetic acid producing bacterial microsymbiont enhance tolerance of the model legume *Medicago truncatula* to iron deficiency. *BioMed Research International* 2018:1-14.
24. Lindsay, W. L and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42:421-428.
25. López-Millán, A-F., F. Morales, A. Abadía and J. Abadía. 2001a. Iron deficiency associated changes in the composition of the leaf apoplastic fluid from field-grown pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Journal of Experimental Botany* 52:1489-1498.
26. Masalha, J., H. Kosegarten, E. Omer and K. Mengel. 2000. The central role of microbial activity for iron acquisition in maize and sunflower. *Biology and Fertility of Soils* 30:433-439.
27. Medina-Juárez, L. Á., D. M. Molina-Quijada, C. L. Del Toro Sánchez, G. A. González-Aguilar and N. Gámez-Meza. 2012. Antioxidant activity of peppers (*Capsicum annum* L.) extracts and characterization of their phenolic constituents. *Interciencia Journal* 37:588-593.
28. Menichini, F., R. Tundis, M. Bonesi, M. R. Loizzo, F. Conforti, G. Statti, B. De Cindio, P. J. Houghton and F. Menichini. 2009. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry* 114:553-560.
29. Msilini, N., H. Attia, M. Rabhi, N. Karray, M. Lachaâl and Z. Ouerghi. 2012. Responses of two lettuce cultivars to iron deficiency. *Experimental Agriculture* 48:523-535.
30. Noguchi, A., T. Yoshihara, A. Ichihara, S. Sugihara, M. Koshino, M. Kojima and Y. Masaoka .1994. Ferric phosphate-dissolving compound, alfafuran, from Alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to iron-deficiency stress. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 58:2312-2313.
31. Osuagwu, G. G. E., H. O. Edeoga and A. N. Osuagwu. 2010. The influence of water stress (drought) on the mineral and vitamin potential of the leaves *Ocimum gratissimum* L. *Recent Research in Science and Technology* 2:27-33.
32. Robin, A., G. Vansuyt, P. Hinsinger, J. M. Meyer, J. F. Briat and P. Lemanceau. 2008. Iron dynamics in the rhizosphere: Consequences for plant health and nutrition. *Advances in Agronomy* 99:183-225.
33. Rodríguez-Celma, J., G. Lattanzio, M. A. Grusak, A. Abadía, J. Abadía and A-F. López-Millán. 2011. Root responses of *Medicago truncatula* plants grown in two different iron deficiency conditions: Changes in root protein profile and riboflavin biosynthesis. *Journal of Proteome Research* 10:2590-2601.
34. Rodríguez-Celma, J., W-D. Lin, G-M. Fu, J. Abadía, A-F. Lopez-Millan and W. Schmidt. 2013. Mutually exclusive alterations in secondary metabolism are critical for the uptake of insoluble iron compounds by *Arabidopsis* and *Medicago truncatula*. *Plant Physiology* 162:1473-1485.
35. Rodríguez-Celma, J., S. Vázquez-Reina, J. Orduna, A. Abadía, J. Abadía, A. Álvarez Fernández and A-F. López-Millán. 2011b. Characterization of flavins in roots of Fe-deficient strategy I plants, with a focus on *Medicago truncatula*. *Plant and Cell Physiology* 6:45-52
36. Rombolà, A. D., Y. Gogorcena, A. Larbi, F. Morales, E. Balde, B. Marangoni, M. Tagliavini and J. Abadía. 2005. Iron deficiency-induced changes in carbon fixation and leaf elemental composition of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Plant and Soil* 271:39-45
37. Schmid, N. B., R. F. H. Giehl, S. Doll, H-P. Mock, N. Strehmel, D. Scheel, X. Kong, R. C. Hider and N. V. Wiren. 2014. Feruloyl-CoA 6'-Hydroxylase1-dependent coumarins mediate iron acquisition from alkaline substrates in *Arabidopsis*. *Plant Physiology* 164: 160-172.
38. Tato, L., P. De Nisi, S. Donnini and G. Zocchi. 2013. Low iron availability and phenolic metabolism in a wild plant species (*Parietaria judaica* L.). *Plant Physiology and Biochemistry* 72: 145-153.
39. Vigani, G and G. Zocchi .2009. The fate and the role of mitochondria in Fe-deficient roots of strategy I plants. *Plant Signaling and Behavior* 4: 375-379.
40. Whetherley, P. E. 1950. Studies in water relations of cotton plants: I. The field measurement of water deficit in leaves. *New Phytologist* 49: 81- 87.
41. Yeh, D. M., L. Lin and C. J. Wright. 2000. Effects of mineral nutrient deficiencies on leaf development, visual symptoms and shoot-root ratio of *Spathiphyllum*. *Scientia Horticulturae* 86: 223-233.

Comparison of Foliar and Soil Fe Fertilization on *Medicago scutellata* Physiological-Biochemical Characteristics and Active Iron in Soils Containing Different Amounts of Lime

Z. Gheshlaghi¹, R. Khorassani^{2*}, M. Kafi³ and A. Fotovat⁴

(Received: November 5-2018; Accepted: February 27-2019)

Abstract

Reducing iron solubility in calcareous soils causes iron chlorosis symptoms in the plant. In order to investigate the response of *M. scutellata* to direct and indirect iron deficiency, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. The experimental factors included three levels of lime (0, 4 and 8%) and five levels of Fe (0, 5 and 10 mg Fe Kg soil⁻¹ as soil application and 0 and 2.1 μM Fe as foliar spray). Zero Fe concentrations in soil and foliar Fe fertilization was considered as control-S and control-F treatment, respectively. The results showed that the amendment of 8% CaCO₃ in control treatments caused typical Fe deficiency symptoms, including decreases in chlorophyll, total and extractable leaf Fe concentration, protein, leaf relative water content, membrane stability index and increases in leaf total phenolic and flavonoid concentration when compared to 0% lime. The soil and foliar Fe fertilisation led to the improvement of Fe chlorosis, increases in chlorophyll, Fe, protein, and decreases in concentration of phenolic compounds in three levels of lime. The foliar Fe fertilization in three levels of lime increased total and extractable leaf Fe content, compared to two soil Fe treatments, but foliar Fe fertilization (in 4 and 8% of lime) yielded progressively lower leaf phenolic compounds. The highest leaf chl concentration in 8% lime was observed in 10 mg Fe Kg soil⁻¹ and foliar Fe fertilization. The presented data indicate that the use of foliar application of Fe (Fe- EDDHA) is potent to reduce the effects of lime induced chlorosis in plants in calcareous soils.

Keywords: Calcium carbonate, Chlorosis, Fe-EDDHA, Phenolic and Flavonoids Compounds

1, 2, 4. PhD Graduate, Associate Professor and Professor, Respectively, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*: Corresponding Author, Email: khorasani@um.ac.ir