مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

# بررسی اثرات محلول‌پاشی نانو کلات آهن بر میزان متابولیت‌ها و ارزش غذایی گیاه کاهو (*Lactuca sativa* Linn.)

رقیه حیدری[۱]، الهام محجل کاظمی[۲،۳]، هوشنگ نصرتی[۴]، مریم کلاهی[۵*]، علی موافقی[۶]

۱-دانشجوی دکتری گروه علوم گیاهی، زیست سلولی و مولکولی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲-دانشیار گروه علوم گیاهی، زیست سلولی و مولکولی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳-پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران

۴-استاد گروه علوم گیاهی، زیست سلولی و مولکولی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۵-دانشیار گروه زیست، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

۶-استاد گروه علوم گیاهی، زیست سلولی و مولکولی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

**اطلاعات مقاله**

**تاریخ های مقاله :**

**تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۹**

**تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱**

**کلمات کلیدی:**

سیستم تغذیه‌ای،

کاهو (*Lactuca sativa* Linn.)،

عناصر ریزمغذی،

نانو کلات آهن

**DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1.**

* مسئول مکاتبات:

m.kolahi@scu.ac.ir

## چکیده

در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهش‌ها در پی یافتن راهکارهای مناسبی جهت بهبود ارزش غذایی گیاهان و افزایش تولید محصولات بودند. به منظور افزایش عملکرد گیاهان و کاهش مصرف منابع غذایی حیوانی نیاز به استفاده از تکنیک‌های نوین زراعی است. یکی از مهم‌ترین تکنیک‌ها جهت بهبود سیستم تغذیه‌ای گیاهان و کاهش کاربرد کودهای شیمیایی استفاده از کودهای سنتتیک با بنیان آلی مانند نانو کلات آهن است. کودهای نانو به‌راحتی توسط گیاه جذب می‌شوند و کارایی بیشتری نسبت به کودهای شیمیایی معمولی دارند. بر همین اساس، این پژوهش به‌منظور ارزیابی تأثیر نانو کلات آهن بر ارزش غذایی و میزان جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاه کاهو انجام شد. این پژوهش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار در آزمایشگاه سیتوشیمی دانشگاه تبریز در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ صورت گرفت. جهت بررسی اثرات نانوکلات آهن بر میزان پتانسیل گیاه کاهو به منظور جذب عناصر ریزمغذی از ۳ سطح نانو کلات آهن (۰، ۰/۵ و ۱ گرم در لیتر) استفاده شد. در حضور نانو کلات آهن محتوای متابولیت‌های ثانویه از جمله فنل کل، فلاونوئید و به‌علاوه ظرفیت آنتی-اکسیدانی کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش معنی‌داری داشت. همچنین با توجه به نتایج، با افزایش غلظت نانو کلات آهن در میزان متابولیت‌های اولیه مانند پروتئین کل، قند محلول، آمینواسیدهای آزاد گیاه کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مشاهده شد. با افزایش اعمال نانو کلات آهن به گیاه کاهو تجمع عناصر ریزمغذی از جمله آهن، کلسیم، روی، پتاسیم و فسفر در ریشه و اندام هوایی سیر صعودی نشان داد که این افزایش در تیمارهای نانو کلات آهن با غلظت بالاتر بیشتر بود. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش گویای آن بود که نانو کلات آهن علاوه بر افزایش تولید متابولیت‌های اولیه و ثانویه گیاهان می‌تواند به‌عنوان کود مطمئنی جهت تأمین آهن و عناصر ریزمغذی برای آن‌ها مورداستفاده قرار گیرد.

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

## ۱-مقدمه

سبزیجات برگی به جهت دارا بودن کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، ویتامین‌ها و عناصر معدنی یکی از مهمترین اجزای رژیم غذایی سالم برای مصرف‌کنندگان به‌شمار می‌آیند. مطالعات پژوهشگران نشان از آن دارد که استفاده از سبزی سالم و بهداشتی می‌تواند، از بروز بیماری‌های قلبی و برخی از انواع سرطان‌ها به خصوص سرطان گوارش جلوگیری کند. کاهو (*Lactuca sativa* Linn.) گیاهی یکساله از خانواده Asteraceae است که حاوی ویتامین‌های A، B، K و مواد معدنی ضروری مانند کلسیم، فسفر، آهن، پتاسیم، سدیم و همچنین مقدار کمی منیزیم و گوگرد است [۱]. وجود متابولیت‌های ثانویه مانند ترپنوئیدها و فلاونوئیدها نشاندهنده خواص دارویی کاهو است. براساس آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) تولید انواع کاهو طی دو دهه گذشته در جهان رشد ۱۱۸ درصدی داشته است و به این ترتیب این محصول از نظر افزایش سطح زیر کشت پس از ذرت، برنج، سیب زمینی و گوجه فرنگی در رتبه پنجم جهان قرار گرفته است [۲].

امروزه کاربرد فناوری نانو در همه عرصه‌ها از جمله صنایع غذایی و کشاورزی در حال گسترش بوده و به مرور زمان در حال گذار از مرحله‌ی آزمایشگاهی به مرحله‌ی عملیاتی است و همین امر موجب حضور محسوس‌تر این فناوری در بخش صنایع غذایی خواهد شد [۳]. آهن به‌عنوان یکی از عناصر ضروری و کم‌مصرف در بسیاری از فرایندهای گیاهی از قبیل فتوسنتز، تنفس، آسیمیلاسیون نیتروژن، تولید و پاکسازی انواع اکسیژن فعال و حفاظت اسمزی و همچنین به‌عنوان کوفاکتور در ساختار بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی دخالت دارد [٤]. کاربرد نانو کودهای آهن به‌منظور کنترل دقیق آزادسازی عناصر غذایی می‌تواند گامی مؤثر در جهت دستیابی به کشاورزی پایدار و سازگار با محیط‌زیست باشد. نانو کود کلاته آهن دارای بنیان یا کمپلکسی پایدار و قوی بوده و این نانوکمپلکس دارای ۹ درصد آهن محلول است که در بازه pH بین ۳ تا ۱۱ می‌تواند آهن را به‌صورت محلول در آب در اختیار گیاهان قرار دهد. جهت بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی و فائق آمدن بر مشکلات موجود، نانو کودهای آهن می‌توانند یکی از گزینه‌های مناسب به‌شمار آیند. استفاده از نانو کودها به‌عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی می‌تواند جایگزین کودهای مرسوم شده و منجر به آزادشدن عناصر غذایی کود به‌تدریج و به‌صورت کنترل‌شده در خاک شود. به‌علاوه، جذب کودهایی با این ابعاد برای گیاهان راحت‌تر بوده و نسبت به کودهای رایج تأثیر زیادی دارند [۵]. عمل کلاته کردن عناصر غذایی در سیستم بیولوژیک (حیاتی) گیاه، از طریق پیوند با مواد مغذی فلزی و جلوگیری از هدررفتن مواد معدنی در خاک نقش تغذیه‌ای مهمی را ایفا می‌کنند. همچنین آن‌ها می‌توانند همانند حاملین فلزات مؤثر و مواد جدا شده به مواد مغذی اجازه حرکت آزادانه را داخل گیاه دهند [٦]. در همین راستا شرف‌الدین شیرازی در پژوهشی [۷] اثر نانو کلات آهن را بر محتوای کلروفیل کاروتنوئیدها، عملکرد بیوماس، عملکرد ماده خشک، میزان جذب عناصر (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آهن) توسط برگ‌های گیاه دارویی آویشن دنایی را مورد بررسی قرارداد، نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نانو کود کلات آهن بر صفات محتوای کلروفیل، کاروتنوئیدها، عملکرد بیوماس، عملکرد ماده خشک، میزان جذب نیتروژن، آهن، شاخص سطح برگ و میزان جذب پتاسیم در سطح ۵ درصد اثر معنی‌دار افزایشی داشت. همچنین، در آزمایشی توسط نصیری و همکاران [۸] اثر محلول‌پاشی کود آهن و روی بر غلظت عناصر غذایی در بخش هوایی بابونه آلمانی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل از تحقیق نشان داد اثر محلول‌پاشی بر غلظت فسفر، منیزیم، کلسیم، مس، روی و آهن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش آگاهی مردم از ارزش غذایی بالای سبزیجات برگی، در بین جوامع شهری استفاده



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

از سبزیجات رو به افزایش است. سبزیجاتی مانند کاهو از یک سو مهم‌ترین سبزی پهن‌برگ و پرمصرف، با داشتن انواع ویتامین‌ها، مواد معدنی، پروتئین، سلولز، آهن و کلسیم، بیشترین مصرف‌کنندگان را به خود اختصاص داده‌اند و جز محصولات پراهمیت و اساسی در سلامتی انسان نقش بسزایی ایفا می‌کنند. از سویی دیگر محلول‌پاشی نانو کلات آهن با توجه به داشتن سطح ویژه بالا که منجر به تراکم بیشتر مکان‌های جذبی و ظرفیت بالای حذف عوامل تنش‌زا می‌شود، برای اهداف احیایی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. به همین منظور، این پژوهش در راستای ارزیابی نقش نانو کلات آهن بر بهبود سیستم تغذیه‌ای در گیاه کاهو به‌عنوان گیاهی که بخش رویشی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین بررسی برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی این گیاه صورت پذیرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- کشت و تیماردهی

این پژوهش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در آزمایشگاه سیتوشیمی دانشگاه تبریز در سال ۱٤۰۱-۱٤۰۰ انجام گردید. بذر گیاهچه کاهو (*Lactuca sativa* Linn.) در دانشگاه تبریز تهیه شده سپس عمل استریل بذرهای گیاه کاهو انجام شد. بذرها به تعداد ۱۰ عدد در گلدان‌های (قطر ۱۲ و ارتفاع ۱۵ سانتی متر) حاوی پرلیت و کوکوپیت (با نسبت ۲ به ۱) اتوکلاو شده، کشت داده شدند. در ادامه، گلدان‌ها تحت شرایط گلخانه‌ای ۱±۲۵ (دمای روز) و ۱±۲۰ (دمای شب) و شرایط نوری روشنایی/تاریکی ۸/۱٦ قرار داده شدند. پس از جوانه‌زنی بذرها، دانه‌رست‌ها با استفاده از محلول هوگلند ۲۵ درصد (pH=۵/۸-٦) و سپس محلول هوگلند ۵۰ درصد و در انتها با هوگلند کامل، هفته‌ای دو مرتبه آبیاری شدند. حدود سه هفته پس از رسیدن گیاهان به مرحله سه برگی، گیاهچه‌ها با استفاده از نانوکلات آهن خریداری شده از شرکت صدور احرار شرق (خضرا) در ۳ تکرار و ۳ غلظت (۰، ۰/۵ و ۱ گرم در لیتر) هر ۳ روز یکبار بصورت محلول‌پاشی برگی تیماردهی شدند. پس از انجام ۵ مرحله تیماردهی و ۲۸ روز پس از کشت، از برگ سوم گیاهان جهت مطالعات مورد نظراستفاده شد. به‌طوری‌که، جهت مطالعات بیوشیمیایی از نمونه‌های تازه استفاده شد و برای سنجش عناصر معدنی مغذی نمونه‌های ریشه و برگ به آون جهت خشک شدن انتقال داده شدند.

### ۲-۲ سنجش محتوای متابولیت‌های ثانویه (فنل، فلاونوئید) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی به روش DPPH

از معرف فولین سیوکالچو جهت سنجش محتوای فنل کل عصاره‌ها استفاده شد [۹]. مقدار ۰/۱ گرم از بافت برگی در ۲ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد ساییده شد و بعد در لوله‌های آزمایش مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره‌های گیاهی ریخته شد. به هرکدام از لوله‌ها به ترتیب مقادیر ۲/۸ میلی‌لیتر آب دیونیزه، ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۲ درصد و ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین – سیوکالچو افزوده شد. مخلوط به‌دست‌آمده ورتکس شده و در دمای اتاق به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شد و جذب محلول‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول‌موج ۷۲۰ نانومتر نسبت به نمونه‌ی شاهد قرائت شد. در انتها، داده‌ها بر اساس معادل میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر گیاه بیان شدند.

از روش رنگ‌سنجی آلومینیوم کلراید، همراه با تغییراتی جهت سنجش فلاونوئید کل استفاده شد [۱۰]. مقدار ۵۰۰ میکرولیتر از عصاره‌های گیاهی در لوله‌های آزمایش حاوی متانول ۸۰ درصد ریخته شد و سپس به هر یک از لوله‌ها به ترتیب، مقادیر ۱/۵ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر آلومینیم کلراید ۱۰ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر استات پتاسیم ۱ مولار و ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. مخلوط حاصل ورتکس شده و در دمای اتاق به مدت ٤۰ دقیقه قرار گرفت. جذب محلول‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ٤۱۵ نانومتر نسبت به نمونه‌ی شاهد اندازه‌گیری شد. در انتها، مقدار فلاونوئید کل عصاره‌ها بر اساس معادل میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن تر گیاه بیان شد.



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

به‌منظور سنجش DPPH مقدار ۰/۱ گرم بافت برگ در ۵ میلی‌لیتر متانول مخلوط شد و در دور g ۱۰۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس، ۱۰۰۰ میکرولیتر از سوپرناتانت با استفاده از متانول به حجم ۲ میلی‌لیتر رسانده شده و در ادامه ۲ میلی‌لیتر محلول متانولی ۰/۰۰٤ DPPH% به آن افزوده شد. مخلوط بدست آمده به خوبی ورتکس شد و پس از گذشت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق و در تاریکی، در طول موج ۵۱۷ نانومتر نسبت به شاهد جذب نمونه‌ها خوانده شد. در انتها درصد مهار رادیکال آزاد براساس فرمول زیر محاسبه شد [۱۱].

$$\%I = (A\ control - A\ sample) / A\ control \times 100$$

A control: جذب محلول کنترل در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر

A Sample: جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر

**۲-۳- سنجش محتوای متابولیت‌های اولیه (قند محلول، پروتئین کل و آمینواسیدهای آزاد)**

از روش فنل – اسیدسولفوریک جهت اندازه‌گیری قندهای محلول استفاده شد [٤]. به این ترتیب که، ۰/۰۵ گرم از پودر بافت خشک شده گیاهی را در لوله آزمایش ریخته و سپس ۵ میلی‌لیتر الکل اتانول ۷۰ درصد اضافه گردید و به مدت یک هفته در یخچال نگهداری شد. پس از گذشت زمان مورد نیاز، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی، صاف شدند و عمل جداسازی بخش‌های محلول و رسوب از هم انجام پذیرفت. بخش محلول، برای اندازه‌گیری قند محلول مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور سنجش قند محلول، ۵۰۰ میکرولیتر از محلول با استفاده از ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ و ۱ میلی‌لیتر فنل ۵ درصد مخلوط گردید و پس از گذشت ۳۰ دقیقه جذب نمونه‌ها در طول موج ٤۸۵ نانومتر بررسی شد.

جهت انجام محاسبات نهایی آنزیم‌ها، سنجش مقدار کمی پروتئین‌ها ضروری است. برای این عمل از روش برادفورد [۱۲] استفاده شد. ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره به همراه ۱۰۰ میکرولیتر آب مقطر به میکروتیوب جدید انتقال داده شد در ادامه، به تیوب‌ها ۱ میلی‌لیتر معرف برادفورد اضافه شد و پس از عمل ورتکس، به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه در دمای اتاق نگهداری شدند و در انتها جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید. واحد پروتئین بر حسب میلی‌گرم برگرم وزن تر ($mg\ g^{-1}\ FW$) گزارش گردید.

اندازه‌گیری آمینواسیدهای آزاد با استفاده از معرف نین‌هیدرین انجام شد [۱۳]. جهت آماده‌سازی معرف نین‌هیدرین مقدار ۰/۵۵ گرم نین‌هیدرین در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول مخلوط و حل شد و نسبت ۱ به ۵ از عصاره و معرف نین‌هیدرین به‌عنوان محلول سنجش مورد ارزیابی قرار گرفت. محلول حاصل در بن‌ماری با دمای ۸۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷-٤ دقیقه قرار داده شد. پس از سردشدن لوله‌های آزمایش، جذب محلول‌ها در طول‌موج ۵۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. جهت تهیه منحنی استاندارد از غلظت-های ۰ تا ۱ میلی‌مولار گلایسین استفاده شد.

**۲-٤- سنجش عناصر غذایی**

به پودر نمونه‌های خشک شده (۰/۵ گرم) اسید نیتریک (۱۰ میلی لیتر، ٦۵ درصد) جهت هضم اسیدی اضافه شد و نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در زیر هود بخار قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در دمای۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از سرد شدن، به نمونه‌های هضم شده $H_2O_2$ (۱میلی‌لیتر، ۳۰ درصد) اضافه و حرارت داده شد. سپس با استفاده از آب مقطر حجم نهایی نمونه‌ها به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت عناصر معدنی نمونه‌ها با استفاده از طیف سنجی جذب اتمی مدل (Shimadzu AA630 ) اندازه-گیری شد و به صورت میلی‌گرم در گرم وزن خشک بیان گردید [۱٤].

**تجزیه‌وتحلیل آماری**

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل تمام داده‌ها با استفاده از



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

آنالیز واریانس داده‌ها و بسته نرم‌افزاری SPSS 20.0 (SPSS Inc., Chicago, II, USA) انجام شد. میانگین ± انحراف معیار برای ارائه تمام داده‌های تجربی بکار گرفته شد و برای تمامی آزمون‌ها از $p < 0.05$ به‌عنوان سطح معنی‌داری استفاده شد. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Microsoft Excel 2013 انجام گردید.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی محتوای متابولیت‌های ثانویه (فنل، فلاونوئید) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه کاهو تحت‌تأثیر نانو کلات آهن

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بین تیمارهای مختلف نسبت به نمونه‌ی شاهد از لحاظ میزان فنل و فلاونوئید تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. در گیاهان تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نانو کلات آهن نسبت به نمونه‌ی شاهد میزان فنل و فلاونوئید به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، هرچند که محتوای فنل بین نمونه‌ی شاهد و تیمار ۰/۵ گرم در لیتر نانو کلات آهن تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. میزان فنل و فلاونوئید در تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن ۱۸/۹۱ و ٤۱/۹۰ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داشت. به ترتیب بیشترین میزان فنل و فلاونوئید در تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن با مقدار ($mg\ GAE.\ g^{-1}$ FW) ۱/۷۲۹ و ($mg\ QE.\ g^{-1}$ FW) ۰/۵۵۲ مشاهده شد، درحالی‌که، کمترین میزان فنل را تیمار ۰/۵ گرم در لیتر با مقدار ($mg\ GAE.\ g^{-1}$ FW) ۱/٤٤۷ و کمترین مقدار فلاونوئید در نمونه‌ی شاهد با مقدار ($mg\ QE.\ g^{-1}$ FW) ۰/۳۸۹ به خود اختصاص دادند (شکل ۱ a-b) ($p < 0.05$).

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه کاهو تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوکلات آهن قرار گرفت. با مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف نانوکلات آهن بر میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کاهو مشاهده شد که بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در گیاهان تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوکلات آهن نسبت به نمونه‌ی شاهد میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کاهو افزایش معنی‌داری نشان داد. میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار ۱ گرم در لیتر نانوکلات آهن ۱۳/۵۸ درصد و در تیمار ۰/۵ گرم در لیتر نانوکلات آهن ۸/٦۱ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی به ترتیب متعلق به تیمارهای ۱ گرم در لیتر نانوکلات آهن (٦۵/۷۳٤ درصد) و نمونه‌ی شاهد (۵۷/۸۷۲ درصد) بود (شکل ۱ c) ($p < 0.05$). سبزی‌های برگی به جهت دارابودن انرژی کم و به دلیل تناسب صحیح مواد غذایی جزء تغذیه مدرن امروزی محسوب می‌شوند. ازآنجایی‌که، وجود مواد معدنی در بدن برای سلامتی انسان‌ها حیاتی است در صورت برهم خوردن تعادل این مواد معدنی در بدن، سلامت فرد به خطر می‌افتد. آهن از جمله مواد معدنی و الکترولیت‌هایی است که به جهت اهمیت فیزیولوژیکی و متابولیسمی برای بدن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در طول دوره‌ی رشد گیاهان، با توجه به اینکه آهن کوفاکتور یا جز ساختاری بسیاری از آنزیم‌های دخیل در متابولیسم سلولی است مصرف آهن می‌تواند باعث افزایش چشمگیر میزان فعالیت آنزیم PAL و تولید و تجمع متابولیت‌هایی نظیر فلاونوئیدها و فنل‌ها شود [۱۵]. براساس مطالعات مختلف کاربرد کلات آهن به صورت اسپری برگی موجب افزایش میزان فنل و فلاونوئید در میوه‌های توت‌فرنگی و پرتقال نسبت به شاهد شد [۱٦]. به‌کارگیری عناصر ریزمغذی از طریق یکپارچگی غشای سلول‌ها، افزایش پروتئین‌های متالوتیونین و محافظت از مولکول‌های ساختاری دارای اثرات مثبتی بر پتانسیل آنتی‌اکسیدانی هستند [۱۷]. مطالعات اسکفیر و همکاران [۱۸] نشان دادند که کاربرد عناصر ریزمغذی از طریق تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های مسیر بیوسنتزی کربوهیدرات‌ها موجب افزایش کربوهیدرات‌ها شده و این امر به نوبه‌ی خود می‌تواند بر افزایش سنتز ترکیبات فنولی تأثیر داشته باشد.

بسیاری از پژوهش‌ها افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در میوه توت‌فرنگی را با افزایش میزان ویتامین ث، فلاونوئیدها و



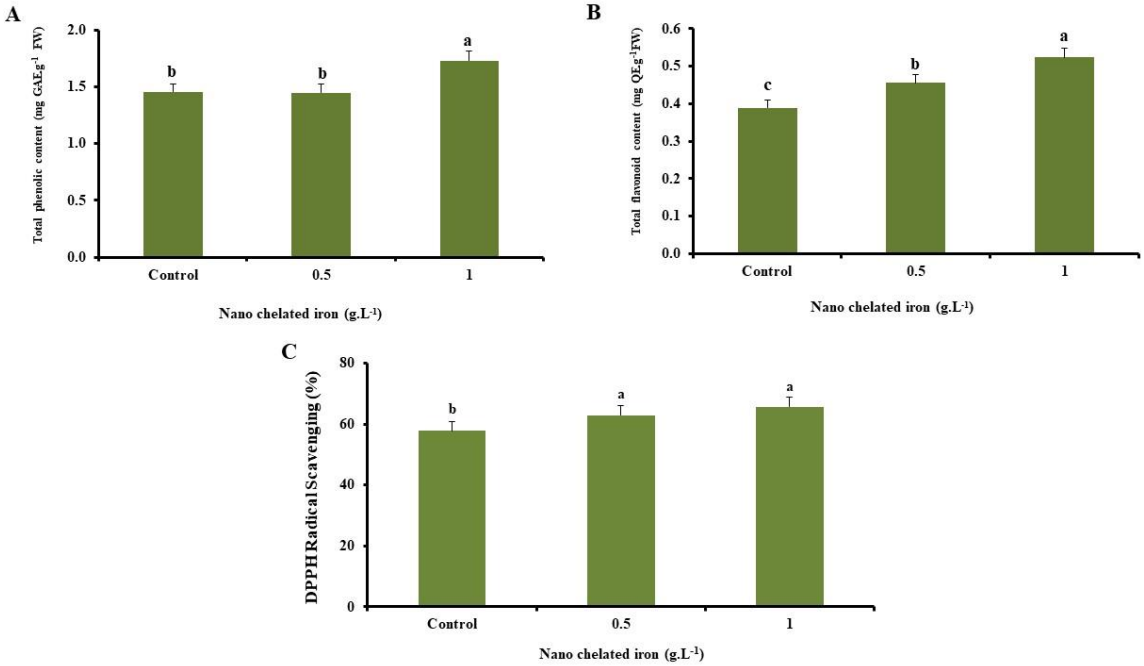
[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

ترکیبات فنلی مرتبط دانستند [۱۹]. مطالعات بر روی ذرت نشان داد که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در اثر کمبود آهن نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافت که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد [۲۰]. مطالعات مانکوئیان سردان [۲۱] بیان داشت که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان بسته به نوع و غلظت تیمارهای مختلف متفاوت خواهد بود. کاربرد نانو کلات آهن با توجه به اینکه گیاه را از کمبود تغذیه ناشی از تنش حفاظت می‌کند، می‌تواند به سیستم دفاعی گیاه در جهت مقابله با تنش کمک کند. به‌کارگیری عناصر ریزمغذی همچون آهن موجب افزایش فعالیت آنزیم PAL و در نتیجه ترکیبات فنلی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه *Kandelia obovata* می‌شود [۲۲].

نتایج حاصل از شکل ۲ بیانگر تغییر محتوای قندمحلول گیاه کاهو تحت تیماردهی با نانو کلات آهن است. مطابق با نتایج حاصل از مقایسه میانگین، با افزایش غلظت نانو کلات آهن نسبت به نمونه‌ی شاهد میزان قندمحلول به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. تیمار ۱ گرم در لیتر نانوکلات آهن حدود ٤٧/٧١ درصد و تیمار ۰/۵ گرم در لیتر حدود ۲۸/۷۵ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش پیدا کردند. بیشترین محتوای قند محلول مربوط به تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن با میزان (mg $g^{-1}$ DW) ۲/۹٤٤ بود (شکل a ۲) ($p < 0.05$).

براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۱)، با




**شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف نانوکلات آهن بر روی A) محتوای فنل کل، B) محتوای فلاونوئید، C) ظرفیت آنتی‌اکسیدانی**

**Figure 1- Effects of different concentrations of nano chelated iron on A) Total phenolic content, B) Total flavonoid content, C) DPPH Radical Scavenging**

### ۳-۲- بررسی محتوای متابولیت‌های اولیه (قند محلول، پروتئین کل و آمینواسیدهای آزاد) گیاه کاهو تحت‌تأثیر نانو کلات آهن

افزایش غلظت نانو کلات آهن محتوای پروتئین کل گیاه کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش نشان داد. بیشترین میزان را تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن با مقدار (mg $g^{-1}$ FW) ۱۰/۰۸٤ و کمترین مقدار را نمونه‌ی شاهد با میزان (mg $g^{-1}$ FW) ۷/۱۳۱ به خود اختصاص دادند. در



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

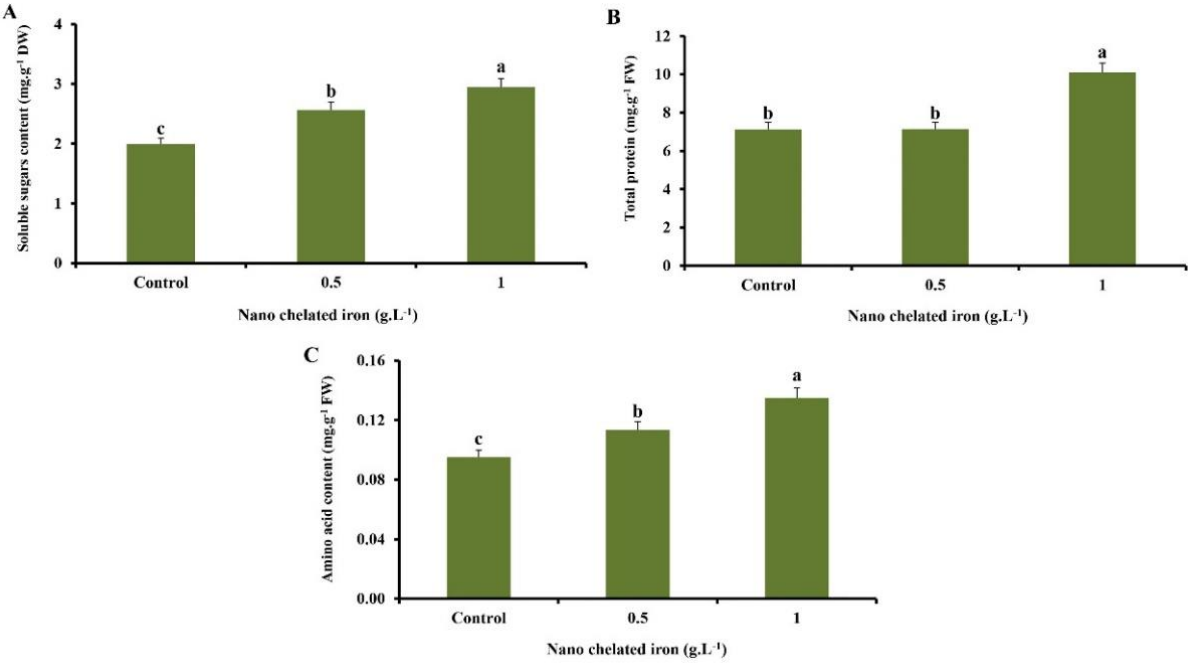
مقدار پروتئین کل گیاه کاهو در تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن ٤۳/۷۹ درصد و در تیمار ۰/۵ گرم در لیتر نانوکلات آهن ۰/۰۱ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مشاهده گردید (شکل ۲ b) ($p < 0.05$). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول۱) نشان داد که بین تیمارهای مختلف در گیاه کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد از لحاظ محتوای آمینواسیدهای آزاد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. با افزایش غلظت نانو کلات آهن محتوای آمینواسیدهای آزاد به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش نشان داد. کمترین میزان آمینواسید آزاد در نمونه‌ی شاهد ( $mg\ g^{-1}$ FW ۰/۱۰۵) و بیشترین آن در تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن ($mg\ g^{-1}$ FW ۰/۱۳۵) مشاهده شد (شکل ۲ c) ($p < 0.05$). بسیاری از محققان بیان داشتند که عناصر ریزمغذی مانند آهن نقش مهمی در تنظیم تعادل غذایی، اعمال متابولیکی سلول‌ها، محافظت غشا در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن دارد؛ بنابراین کاهش در میزان آهن کاهش در رشد، تخلیه و کاهش محتوای قندها را به‌دنبال دارد. نتایج مطالعات مختلف نشان داد که به‌کارگیری نانواکسید آهن موجب افزایش محتوای قندهای محلول در گیاه *Moringa oleifera* نسبت به نمونه‌ی شاهد شد [۲۳]. کاربرد عناصر ریزمغذی با افزایش میزان قند محلول موجب بهبود شرایط فتوسیستم‌ها و تثبیت کانال‌های حمل و نقل قندهای محلول، کاهش ROS، محافظت از ساختار ماکرومولکول‌ها، هموستاز ردوکس و فعالیت چندین آنزیم دفاعی را در گیاهان می‌گردد [۲٤].

آهن یکی از اجزای اصلی ساختار RNA پلیمراز بوده که دسترسی آن تأثیر مستقیمی بر سنتز پروتئین دارد. بنابراین، عناصر ریزمغذی با بهبود نسبی وضعیت رشد گیاه سبب افزایش درصد پروتئین می‌شود. عناصر ریزمغذی همچون آهن می‌توانند به مولکول‌های فعال بیولوژیکی متصل شوند که این اتصال می‌تواند به‌طور مستقیم به مکان‌های خاص درون پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک و ساختارهای زیر سلولی صورت بگیرد و بدین طریق از این مولکول‌ها در برابر شرایط نامساعد محافظت کند [۲۵]. به‌کارگیری آهن از طریق افزایش پروتئین‌های محلول که نقش مهمی در تنظیم اسمزی، تسهیل انتقال آب از غشاها، انباشت اسمولیت‌ها دارند موجب بهبود شرایط رشدی گیاه می‌شوند. پژوهش‌های مختلف گزارش کردند که به‌کارگیری نانواکسید آهن موجب افزایش محتوای پروتئین‌های محلول و آمینواسیدهای آزاد در گیاه *Moringa oleifera* نسبت به نمونه‌ی شاهد شد. کاربرد عناصر ریزمغذی با استفاده از اکسیداسیون تیول و برهم‌کنش متالوپروتئین‌ها با عناصر ریزمغذی موجب محافظت از گروه سولفیدریل پروتئین‌ها شده و مقدار پروتئین‌ها افزایش می‌یابد [۲۳]. هموستاز آمینواسیدها از طریق سنتز یا تجزیه‌ی پروتئین‌ها، بیوسنتز آمینواسیدهای جدید و جذب و جابه‌جایی صورت می‌گیرد. افزایش برخی آمینواسیدها در گیاهان، می‌تواند مربوط به پروتئولیز فعال گلیکوپروتئین‌های دیواره سلولی گیاهان باشد. پژوهش‌های مختلف نشان دادند که کمبود عناصر ریزمغذی با تأخیر در واکنش‌های آنزیمی و کاتالیزوری و تغییر غلظت برخی واکنش‌دهنده‌ها در زنجیره‌ی واکنش موجب کاهش تعدادی از آمینواسیدها در گیاهان می‌شود. همچنین، به‌کارگیری عناصر ریزمغذی از طریق افزایش سطح آمینواسیدها و تنظیم اسمولیتی انتقال یون‌ها در گیاه برنج منجر به افزایش تولید محصول و میزان ماده خشک گیاهان می‌گردد [۲٦].



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]




**شکل ۲- اثر غلظت‌های مختلف نانوکلات آهن بر روی A) محتوای قندمحلول، B) محتوای پروتئین کل، C) محتوای آمینواسید آزاد**

**Figure 3- Effects of different concentrations of nano chelated iron on A) soluble sugar content, B) total protein content, C) free amino acid content**

**جدول ۱- تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی گیاه کاهو تحت تاثیر نانوکلات آهن**

**Table 1- Variance analysis of biochemical traits of lettuce under the influence of nano chelated iron**

| منابع تغییرات S.O.V | درجه آزادی df | فنل Phenol (mg $g^{-1}$ FW) | فلاونوئید Flavonoid (mg $g^{-1}$ FW) | ظرفیت آنتی‌اکسیدانی DPPH (%) | قند محلول Soluble sugar (mg $g^{-1}$ DW) | پروتئین کل Total protein (mg $g^{-1}$ FW) | آمینواسید آزاد Free amino acid (mg $g^{-1}$ FW) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نانو کلات آهن Nano chelated iron | 2 | 0.076** | 0.006** | 47.467** | 0.688** | 8.729** | 0.001** |
| خطا Error | 6 | 0.000054 | 0.000010 | 2.469 | 0.000024 | 0.000025 | 0.000001 |
| ضریب تغییرات (٪) (C.V) | | 2.45 | 4.91 | 2.17 | 1.15 | 0.36 | 8.54 |

**ns: not significant, *p < 0.05, **p < 0.01**

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

جدول ۲- تجزیه واریانس میزان کادمیوم و عناصر معدنی در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهو تحت تاثیر نانوکلات آهن

**Table 2- Variance analysis of mineral elements in roots and shoots of lettuce under the influence of Nano chelated iron**

| منابع تغییرات S.O.V | درجه آزادی df | آهن ریشه Fe root (mg $g^{-1}$ DW) | آهن ساقه Fe shoot (mg $g^{-1}$ DW) | روی ریشه Zn root (mg $g^{-1}$ DW) | روی ساقه Zn shoot (mg $g^{-1}$ DW) | کلسیم ریشه Ca root (mg $g^{-1}$ DW) | کلسیم ساقه Ca shoot (mg $g^{-1}$ DW) | پتاسیم ریشه K root (mg $g^{-1}$ DW) | پتاسیم ساقه K shoot (mg $g^{-1}$ DW) | فسفر ریشه P root (mg $g^{-1}$ DW) | فسفر ساقه P shoot (mg $g^{-1}$ DW0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نانو کلات آهن Nano chelated iron | 2 | 0.008** | 0.014** | 0.010** | 0.002** | 0.359** | 0.224** | 0.136** | 0.774** | 0.904** | 0.142** |
| خطا Error | 6 | 0.000004 | 0.000002 | 0.000008 | 0.000001 | 0.00012 | 0.00029 | 0.00001 | 0.00017 | 0.00019 | 0.00010 |
| ضریب تغییرات (٪) (C.V) | | 7.02 | 4.92 | 8.81 | 8.06 | 1.04 | 1.05 | 1.89 | 1 | 1.16 | 1.14 |

**ns: not significant, *p < 0.05, **p < 0.0**

### ۳-۳- بررسی غلظت عناصر روی، آهن، پتاسیم، کلسیم و فسفر در گیاه کاهو تحت‌تأثیر نانو کلات آهن

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که غلظت عناصر ریزمغذی گیاه کاهو تحت تاثیر تیمار نانو کلات آهن قرار گرفت. با افزایش غلظت نانو کلات آهن غلظت عناصر روی، آهن، پتاسیم، کلسیم و فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد، هر چند که در غلظت فسفر در اندام هوایی با اعمال تیمار نانو کلات آهن ابتدا افزایش سپس کاهش مشاهده شد. بیشترین غلظت عناصر آهن (mg $g^{-1}$ DW) ۰/۲٦٦، روی (mg $g^{-1}$ DW) ۰/۲۷۸، کلسیم (mg $g^{-1}$ DW) ۵/۰۸۸، پتاسیم (mg $g^{-1}$ DW) ۱/۳۸۲ و فسفر (mg $g^{-1}$ DW) ۵/٤٦ در ریشه‌ی گیاه کاهو متعلق به تیمار ۱ گرم در لیتر نانوکلات آهن بود. همچنین، بیشترین میزان عناصر در اندام هوایی گیاه کاهو در تیمار ۱ گرم در لیتر نانو کلات آهن با مقدار آهن (mg $g^{-1}$ DW) ۰/۳۰۳، روی (mg $g^{-1}$ DW) ۰/۱٤۸، کلسیم (mg $g^{-1}$ DW) ٦/۵۷، پتاسیم (mg $g^{-1}$ DW) ٦/۰۲٦ و فسفر (mg $g^{-1}$ DW) ٤/۰۹۳ مشاهده شد (شکل ۳ a-J) ($p < 0.05$).

حمزه و همکاران (۲۰۲۲) بیان داشتند که تحت تیمار کمپلکس آهن در گیاهان، چندین ناقل آهن می‌تواند روی را به صورت یک کاتیون دوظرفیتی و یا به صورت کمپلکس متصل به سیدروفورها از ریشه به اندام هوایی منتقل کند [۲۸]. به همین منظور، در مطالعه‌ی حاضر غلظت عنصر روی در گیاهان تحت تیمار با نانو کلات آهن در اندام هوایی کاهو بیشتر از ریشه مشاهده شد [۲۷]. نتایج مطالعات بر روی *Brassica napus* نشان داد که اعمال آهن به‌طور معنی‌داری موجب افزایش غلظت روی، فسفر، کلسیم، پتاسیم، سدیم و آهن نسبت به نمونه‌ی شاهد در ریشه و اندام هوایی شد [۲۹]. همچنین، پژوهش‌های مختلف گزارش کردند که با افزایش محلول‌پاشی کود آهن غلظت آهن و فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه گندم و کاهو به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافت، چرا که کمپلکس‌های آهن نقش مهمی در انتقال الکترون دارد و جذب عنصری مانند فسفر به صورت فعال انجام می‌پذیرد بنابراین کمبود آهن به طور



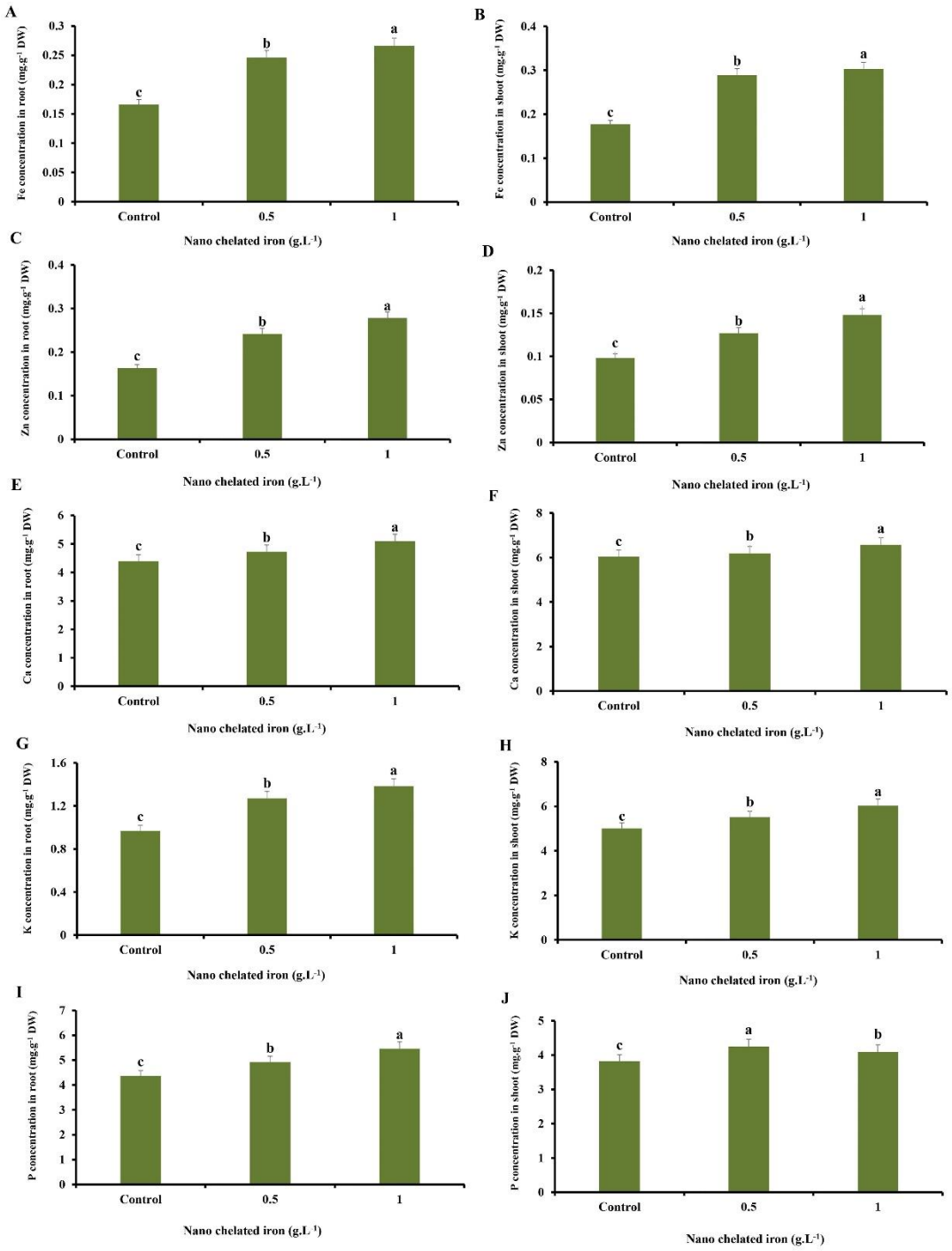
[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

مستقیم موجب کاهش میزان جذب فسفر در گیاهان می‌شود [۳۰،۳۱]. فسفر از جمله عناصری است که مقدار زیادی با فرآیند تبادل کاتیون- آنیونی در سلول‌های ریشه با خاک وارد گیاه می‌شود و کمبود آهن می‌تواند جذب و انتقال فسفر را کاهش دهد به‌طوری‌که، با اعمال آهن می‌تواند به غلظت مطلوب برای گیاه برسد زیرا جذب آنیون‌هایی مانند فسفر در جذب کاتیون‌ها توسط گیاهان نقش مهمی دارد [۳۲]. اعمال کمپلکس‌های آهن به عنوان الیسیتور از روش‌های مختلفی منجر به افزایش جذب مواد معدنی می‌شود که در اینجا به چند مورد اشاره می‌شود: ۱) با افزایش نفوذ ریشه در خاک افزایش جذب مواد معدنی صورت می‌گیرد. ۲) آهن منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب، افزایش ظرفیت تبادل یافتن کاتیون‌ها و بهبود جذب و غلظت مواد معدنی می‌شود. ۳) آهن از طریق ایجاد تغییر در حمل و نقل موجب کاهش سرعت از دست رفتن کاتیون‌ها می‌شود. اعمال آهن به گیاهان با تنظیم فعالیت انتقال‌دهنده‌هایی نظیر ZIPs (ناقل روی/آهن) و IRT11 (ناقل تنظیم شده آهن) منجر به افزایش جذب عناصر ریزمغذی از طریق ناقل کاتیون‌های دو ظرفیتی شده و غلظت کاتیون‌ها در ریشه و اندام هوایی گیاهانی همچون برنج افزایش می‌یابد [۳۳].

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]




شکل ۳- اثر غلظت‌های مختلف نانوکلات آهن بر روی **A)** غلظت آهن در ریشه، **B)** آهن در اندام هوایی، **C)** روی در ریشه، **D)** روی در اندام هوایی، **E)** کلسیم در ریشه، **F)** کلسیم در اندام هوایی، **G)** پتاسیم در ریشه، **H)** پتاسیم در اندام هوایی، **I)** فسفر در ریشه، **J)** فسفر در اندام هوایی

**Figure 3- Effects of different concentrations of nano chelated iron A) Fe concentration in root, B) Fe concentration in shoot, C) Zn concentration in root, D) Zn concentration in shoot, E) Ca concentration in root, F) Ca concentration in shoot, G) K concentration in root, H) K concentration in shoot, I) P concentration in root, J) P concentration in shoot**

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

## ٤-نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر، اثر نانو کلات آهن بر میزان متابولیت‌های اولیه و ثانویه و همچنین ارزش غذایی کاهو مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سطوح نانو کلات آهن میزان متابولیت‌های ثانویه (از جمله فنل، فلاونوئید) و میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه کاهو نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش معنی‌داری داشت. همچنین، میزان متابولیت‌های اولیه از قبیل پروتئین کل، قند محلول، محتوای آمینواسیدهای آزاد گیاه کاهو تحت‌تأثیر نانو کلات آهن افزایش معنی‌داری نشان داد. به نظر می‌رسد آهن از طریق تأثیر بر مسیر بیوسنتز ترکیبات فنلی، قندها، پروتئین‌ها و آمینواسیدها منجر به افزایش ارزش غذایی گیاه کاهو شده است. به‌علاوه، نانو کلات آهن در میزان غلظت‌های عناصر ریزمغذی همچون روی، آهن، کلسیم، پتاسیم و فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهو تأثیرگذار بود و افزایش معنی‌داری آنها را نسبت به نمونه‌ی شاهد در پی داشت. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که نانو کلات آهن نانو قادر به تأمین آهن موردنیاز کاهو در شرایط کشت بدون خاک بوده و علاوه بر، برطرف‌کردن آهن مورد نیاز گیاه، قادر به تأمین مداوم عناصر ریزمغذی دیگری مانند کلسیم، روی، پتاسیم، فسفر نیز است. براساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان پیشنهاد کرد که نانو کلات آهن می‌تواند به‌عنوان کود مطمئنی به جهت تأمین آهن، روی و پتاسیم، کلسیم و فسفر در کشت بدون خاک کاهو مورداستفاده قرار گیرد. در همین راستا، می‌توان سایر نانو کودها و یا نانوذرات را در جهت بهبود ارزش غذایی سبزیجات مورد ارزیابی قرارداد.

## ٥-سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه تبریز و شهید چمران برای تأمین هزینه‌های این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ٦-منابع

[1] Abdalla, M. A., Li, F., Wenzel-Storjohann, A., Sulieman, S., Tasdemir, D., & Mühling, K. H. 2021. Comparative metabolite profile, biological activity and overall quality of three lettuce (*Lactuca sativa* L., Asteraceae) cultivars in response to sulfur nutrition. Pharmaceutics, 13(5), 713. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13050713.

[2] Roa, J. 2023. Informal Food Markets in Quezon City and Pasay City, Philippines: A Rapid Assessment. Resilient Cities Initiative Research Report. https://doi.org/10.4160/9789290606642.

[3] Baruah, S., & Dutta, J. 2009. Nanotechnology applications in pollution sensing and degradation in agriculture: a review. Environmental Chemistry Letters, 7, 191-204. https://doi.org/10.1007/s10311-009-0228-8.

[4] Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. Handbook of phycological methods, Physiological and biochemical methods., 95.

[5] Cui, H. X., Sun, C. J., Liu, Q., Jiang, J., & Gu, W. 2010. Applications of nanotechnology in agrochemical formulation, perspectives, challenges and strategies. In international conference on Nanoagri, Sao pedro, Brazil (pp. 28-33).

[6] Liu, X. M., Feng, Z. B., Zhang, F. D., Zhang, S. Q., & He, X. S. 2006. Preparation and testing of cementing and coating nano-subnanocomposites of slow/controlled-release fertilizer. Agricultural Sciences in China, 5(9), 700-706. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(06)60113-2.

[7] Sharafaldin Shirazi, sh. and Fazli, F. 2012. The effect of microcalt and iron sulfate on yield and yield components of Thymus Celak daenesis. Bimonthly Scientific-Research Journal of Medicinal and Aromatic Plants of Iran, Vol.31, No.2, p. (In persian).

[8] Nasiri, Y. Zahtabsalmasi, S. Nasralehzadeh, p. Qasemigalazani, K. Najafi, N. A. and Javanmard, A. A. 2013. Evaluation of the effect of foliar spraying of iron and zinc sulfate on flower yield and concentration of nutrients in the aerial part of German chamomile, Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 23: 105-115. (In persian).



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

[9] Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. Journal of food and drug analysis, 10(3). https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748.
[10] Meda, A., Lamien, C. E., Romito, M., Millogo, J., & Nacoulma, O. G. 2005. Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in Burkina Fasan honey, as well as their radical scavenging activity. Food chemistry, 91(3), 571-577. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.006
.
[11] Miliauskas, G., Venskutonis, P. R., & Van Beek, T. A. 2004. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. Food chemistry, 85(2), 231-237. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.05.007
.
[12] Mm, B. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal Biochem, 72, 248-254.
[13] Hwang, M. N., & Ederer, G. M. 1975. Rapid hippurate hydrolysis method for presumptive identification of group B streptococci. Journal of Clinical Microbiology, 1(1), 114-115. https://doi.org/10.1128/jcm.1.1.114-115.1975.
[14] Bichi, A. M., & Ibrahim, S. R. 2018. Plant diversity and profile distribution of some available Micronutrients in selected soils of Kano State, Nigeria. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences, 11(2), 20-31. 10.4314/bajopas.v11i2.4.
[15] Pestana, M., Correia, P. J., Saavedra, T., Gama, F., Abadía, A., & de Varennes, A. 2012. Development and recovery of iron deficiency by iron resupply to roots or leaves of strawberry plants. Plant physiology and biochemistry, 53, 1-5. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.01.001.
[16] Chen, P., Cao, Y., Bao, B., Zhang, L., & Ding, A. 2017. Antioxidant capacity of Typha angustifolia extracts and two active flavonoids. Pharmaceutical biology, 55(1), 1283-1288. https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1300818
.
[17] Lee, K. H., Cha, M., & Lee, B. H. 2020. Neuroprotective effect of antioxidants in the brain. International journal of molecular sciences, 21(19), 7152. 10.3390/ijms21197152.
[18] Schefer, S., Oest, M., & Rohn, S. 2021. Interactions between phenolic acids, proteins, and carbohydrates—Influence on dough and bread properties. Foods, 10(11), 2798. https://doi.org/10.3390/foods10112798.
[19] de Silva, N. D. G., Cholewa, E., & Ryser, P. 2012. Effects of combined drought and heavy metal stresses on xylem structure and hydraulic conductivity in red maple (*Acer rubrum* L.). Journal of experimental botany, 63(16), 5957-5966. https://doi.org/10.1093/jxb/ers241.
[20] Jalali, M., Ghanati, F., & Modarres-Sanavi, A. M. 2016. Effect of Fe3O4 nanoparticles and iron chelate on the antioxidant capacity and nutritional value of soil-cultivated maize (*Zea mays*) plants. Crop and Pasture Science, 67(6), 621-628. https://doi.org/10.1071/CP15271.
[21] Manquián-Cerda, K., Cruces, E., Escudey, M., Zúñiga, G., & Calderón, R. 2018. Interactive effects of aluminum and cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets cultivated in vitro. Ecotoxicology and environmental safety, 150, 320-326. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.050.
[22] Sun, B., Jing, Y., Chen, K., Song, L., Chen, F., & Zhang, L. 2007. Protective effect of nitric oxide on iron deficiency-induced oxidative stress in maize (*Zea mays*). Journal of plant physiology, 164(5), 536-543. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.02.011.
[23] Tawfik, M. M., Mohamed, M. H., Sadak, M. S., & Thalooth, A. T. 2021. Iron oxide nanoparticles effect on growth, physiological traits and nutritional contents of *Moringa oleifera* grown in saline environment. Bulletin of the National Research Centre, 45(1), 1-9. https://doi.org/10.1186/s42269-021-00624-9.
[24] Ahanger, M. A., & Agarwal, R. M. 2017. Potassium up-regulates antioxidant metabolism and alleviates growth inhibition under water and osmotic stress in wheat (*Triticum aestivum* L). Protoplasma, 254, 1471-1486. https://doi.org/10.1007/s00709-016-1037-0.
[25] Khan, M. A., & Domashevskiy, A. V. 2021. Iron enhances the binding rates and translational efficiency of iron responsive elements (IREs) mRNA with initiation factor eIF4F. PLoS One, 16(4), e0250374. 10.1371/journal.pone.0250374.
[26] He, Y., Dai, S., Dufresne, C. P., Zhu, N., Pang, Q., & Chen, S. 2013. Integrated



[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

proteomics and metabolomics of *Arabidopsis* acclimation to gene-dosage dependent perturbation of isopropylmalate dehydrogenases. PLoS One, 8(3), e57118. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057118.
[27] Hamzah Saleem, M., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M. 2022. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, 13, 1033092. 10.3389/fpls.2022.1033092.
[28] Benáková, M., Ahmadi, H., Dučaiová, Z., Tylová, E., Clemens, S., & Tůma, J. 2017. Effects of Cd and Zn on physiological and anatomical properties of hydroponically grown *Brassica napus* plants. Environmental Science and Pollution Research, 24, 20705-20716. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9697-7.
[29] Nam HI, Shahzad Z, Dorone Y, Clowez S, Zhao K, Bouain N, Lay-Pruitt KS, Cho H, Rhee SY, Rouached H. 2021. Interdependent iron and phosphorus availability controls photosynthesis through retrograde signaling. Nat Commun, 12(1), 7211. 10.1038/s41467-021-27548-2.
[30] Johan, P. D., Ahmed, O. H., Omar, L., & Hasbullah, N. A. 2021. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. Agronomy, 11(10), 2010. https://doi.org/10.3390/agronomy11102010.
[31] Heydari, R., Kazemi, E. M., Kolahi, M., Movafeghi, A., & Nosrati, H. (2024). Modulation of cadmium induced oxidative stress pathways in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by nano-chelated iron. *Scientia Horticulturae*, *337*, 113530. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113530.
[32] Clemens, S., Deinlein, U., Ahmadi, H., Höreth, S., & Uraguchi, S. 2013. Nicotianamine is a major player in plant Zn homeostasis. Biometals, 26, 623-632. https://doi.org/10.1007/s10534-013-9643-1.
[33] Heydari, R., Kolahi, M., Mohajel Kazemi, E., Nosrati, H., & Movafeghi, A. (2024). The role of nano-chelated iron on anatomical and biochemical characteristics and concentration of mineral nutrients in lettuce (*Lactuca sativa* L.) under cadmium toxicity. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *30*(8), 1383-1400. doi: 10.1007/s12298-024-01490-1.

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]

Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

# Investigating the effect of foliar application of nano chelated iron on the amounts of metabolites and nutritional value of lettuce (*Lactuca sativa* Linn.)

**Roghayeh Heydari[1], Elham Mohajel Kazemi[2,3], Houshang Nosrati[4], Maryam Kolahi*[5], Ali Movafeghi[6]**

**1-PhD Student of the Department of Plant, Cell and Molecular biology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran**

**2- Associate Professor of the Department of Plant, Cell and Molecular biology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran**

**3 -Nuclear Agriculture School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Atomic Energy Organization of Iran (AEQI), Karaj, Iran**

**4- Professor of the Department of Plant, Cell and Molecular biology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran**

**5- Associate Professor of Department of Biology, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**

**6- Professor of the Department of Plant, Cell and Molecular biology, Faculty of Natural Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran**

**ARTICLE INFO**

**Article History:**

Received:2023/12/30

Accepted:2025/1/30

**Keywords:**

extraction,

pomegranate peel,

solvent,

effective compounds,

Antifungal.

**DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1.**

*Corresponding Author E-

m.kolahi@scu.ac.ir

**ABSTRACT**

In recent years, many research studies have conducted to find ways to improve agricultural products and eliminate chemical fertilizer pollutants. To enhance crop yields and minimize the reliance on animal feed resources, it is essential to adapt innovative agricultural practices. Organic-based synthetic fertilizers, such as nano chelated iron can significantly enhance the nutritional system of plants while reducing the reliance on chemical fertilizers. Nano fertilizers are easily absorbed by plants and are more effective than traditional chemical fertilizers. Based on this information, this study was conducted to investigate the nutritional value of lettuce and its capacity to absorb micronutrient elements. The study was conducted at Tabriz University during the years 1400-1401, following a completely randomized design with three repetitions. Three levels of nano chelated iron (0, 0.5 and 1 g/L) were used to investigate the effect of nano chelated iron on the absorption of micronutrients by lettuce plants. Nano chelated iron significantly enhanced the levels of secondary metabolites, including total phenols and flavonoids, as well as the antioxidant capacity of lettuce compared to the control samples. Additionally, the results indicated that higher concentrations of nano chelated iron resulted in increased levels of total protein, soluble sugars, and free amino acids in lettuce plants compared to the control sample. It has been demonstrated that micronutrients such as Iron, Calcium, Zinc, Potassium, and Phosphorus accumulate in the roots and shoots of lettuce plants with the increased application of nano chelated iron. The increase was more pronounced in plants that received higher concentrations of nano chelated iron. This study demonstrated that nano chelated iron enhances plant primary and secondary metabolites, while also supplying iron and other micronutrients to the plants.

[ Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-20 ]

[ DOI: 10.22034/FSCT.22.163.1 ]