

DOI: 10.22070/hpn.2020.5536.1099

## Influence of iron leaf nutrition on chlorophyll content and some antioxidant enzyme activities of strawberry fruit cv. Camarosa

Saeed Rezaei<sup>1\*</sup>, Mohammad Esmaeil Amiri<sup>2</sup>, Abbas Bahari<sup>3</sup>, Farhang Razavi<sup>4</sup>,  
Morteza Soleimani Aghdam<sup>5</sup>

1- Corresponding Author, Ph.D Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. rezaei.s@znu.ac.ir

2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. m-amiri@znu.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Agronomy Science in Research, Institute of Modern Biological Techniques, University of Zanjan, Zanjan, Iran. bahari@znu.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. razavi.farhang@znu.ac.ir

5- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. soleimaniaghdam@eng.ikiu.ac.ir

Received Date: 2020/05/11

Accepted Date: 2020/11/25

### Abstract

**Introduction:** Iron is considered as a micro-element with essential roles in plant metabolism and also, is a cofactor in function of antioxidant enzymes. The strawberry is one of the favorite fruits throughout the world and may be classified as a functional food as it is a rich source of phytochemicals and vitamins. Therefore, nutrition of foliar minerals is of particular importance for the rapid supply of plant nutrients. The aim of this study was to determination of optimum concentration and evaluation the pre-harvest application of iron on some antioxidant enzyme activities and qualitative characteristics of strawberry fruit during developmental stages.

**Material and methods:** The experiment was factorial based on a randomized complete block design with three replications. This experiment was carried out at University of Zanjan in spring and summer of 2018. Firstly, in a pretest, the effect of different amounts of iron was investigated (0-200-400-600-800-1000-1200-1400-1600-1800 and 2000  $\mu\text{mol/L}$ ) at 3, 6, 9 and 12 days after the foliar application in some of the characteristics. Then, the concentration of 1400  $\mu\text{mol/L}$  was considered as the optimum concentration. Finally, data analysis was done using SPSS<sub>ver 22</sub> and means were compared by Duncan's multiple range tests at 5% level of Probability.

**Results and discussion:** Results showed that chlorophyll a, chlorophyll b, catalase, peroxides and ascorbate peroxidase were significantly increased by iron treatment in comparison to the controls. In addition, strawberry fruits treated with iron in comparison to the controls exhibited lower MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content. But it had no significant effect on SOD enzyme, pH and soluble protein. In addition to the above results, application of 1400  $\mu\text{mol/L}$  iron accelerated fruit ripening for 3-4 days. The main reasons for the effect of treatment can be related to the increase iron content in plant, decrease in competition between vegetative and reproductive growth, as well as better chlorophylls efficiency. According to the results, application of iron during fruit growth stage increased the activity of most antioxidant enzymes and improved the quality of strawberry fruit. These results are in agreement with those obtained by Pestana et al. (2013) and Zaerei et al. (2016) of strawberry growth and crop yield improved by foliar application of iron chelate. The experiments clearly demonstrated the beneficial effects of foliar Fe-EDTA application on some antioxidant enzyme activities and qualitative characteristics of strawberry fruit during developmental stages.

**Conclusions:** Overall, the findings of current study elucidated that for the production of strawberry cv. Camarosa greenhouses and its cultivation in hydroponic, according to the results of this study, a concentration of 1400  $\mu\text{mol/L}$  can be suggested by spraying method.

**Keywords:** Spraying, Greenhouse, Photosynthesis, Ripening, Camarosa.

## اثر تغذیه برگی آهن بر میزان کلروفیل و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا

سعید رضائی<sup>۱\*</sup>، محمد اسماعیل امیری<sup>۲</sup>، عباس بهاری<sup>۳</sup>، فرهنگ رضوی<sup>۴</sup>، مرتضی سلیمانی‌اقدام<sup>۵</sup>

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری فیزیولوژی و اصلاح درختان میوه، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
rezaei.s@znu.ac.ir

۲- استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
m-amiri@znu.ac.ir

۳- استادیار پژوهشکده فناوری‌های نوین زیستی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
bahari@znu.ac.ir

۴- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
razavi.farhang@znu.ac.ir

۵- استادیار گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران  
soleimaniaghdam@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲

### چکیده

آهن از عناصر ضروری ریز مغذی در گیاهان به شمار می‌رود که نقش مهمی در رشد و نمو میوه توت‌فرنگی دارد. هدف از این پژوهش، تغذیه برگی آهن، تعیین غلظت بهینه و بررسی تاثیر آن بر برخی خصوصیات میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در یک گلخانه هیدروپونیک در شهر زنجان اجرا شد. بدین منظور، ابتدا در یک آزمایش مقدماتی تاثیر محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف آهن (صفر - ۲۰۰ - ۴۰۰ - ۶۰۰ - ۸۰۰ - ۱۰۰۰ - ۱۲۰۰ - ۱۴۰۰ - ۱۶۰۰ - ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ میکرومول بر لیتر) طی چهار نوبت زمانی (سه، شش، نه و ۱۲ روز بعد از محلول‌پاشی) در میوه توت‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر به عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید. نتایج نشان داد اثر محلول‌پاشی غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر کلروفیل a، کلروفیل b، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)، آسکوربات پراکسیداز (AXP)، محتوای مالون‌دی‌آلدنید (MDA) و پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) معنی‌دار بود در حالی که بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پروتئین محلول کل و pH آب میوه تاثیر معنی‌داری نداشت. افزون بر این، کاربرد آهن منجر به افزایش ۸/۲۱ درصدی کلروفیل a، ۷/۶۷ درصدی کلروفیل b، ۱۳/۳۶ درصدی CAT، ۲۴/۵۴ درصدی POD، ۱۸/۰۴ درصدی AXP و کاهش ۱۱/۲ درصدی MDA و ۸/۵۴ درصدی  $H_2O_2$  در میوه‌های محلول‌پاشی شده در مقایسه با میوه‌های شاهد شد. همچنین، غلظت انتخابی آهن موجب تسریع رسیدگی میوه به مدت سه تا چهار روز گردید. دلایل اصلی تاثیر محلول‌پاشی آهن را می‌توان به افزایش آهن درونی گیاه و کارایی بهتر کلروفیل‌های a و b مرتبط دانست. به طور کلی، جهت تولید گلخانه‌ای میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا و کشت آن در محیط بدون خاک، با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن با روش محلول‌پاشی را پیشنهاد نمود.

**کلمات کلیدی:** محلول‌پاشی، گلخانه، فتوسنتز، رسیدگی، کاماروسا.

## مقدمه

توت‌فرنگی از مهم‌ترین میوه‌های ریز مناطق معتدله است که با توجه به اهمیت اقتصادی و تغذیه‌ای این محصول، کشت و تولید گلخانه‌ای آن طی سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است (Miri et al., 2017). ارزش خوراکی و خواص آنتی‌اکسیدانی فراوان میوه توت‌فرنگی برای همگان آشکار و روشن است، به همین دلیل امروزه تلاش‌های زیادی جهت بهبود و ارتقای این ویژگی‌ها صورت می‌گیرد (Asadi Gharneh et al., 2015; Kaya et al., 2019).

نحوه رشد و نمو گیاه، کیفیت میوه و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند تحت تأثیر مدیریت تغذیه در طی دوره رشدی گیاه قرار گیرد. گزارش شده است که تغذیه برگ‌ی عناصر معدنی موجب بهبود عملکرد کلروفیل و سیستم فتوسنتزی می‌گردد (Ghasemi et al., 2019). بنابراین، لازم است در طول دوره رشد و مراحل قبل از برداشت محصول، طبق اصول علمی نسبت به توصیه کودی مناسب اقدام گردد تا نه تنها عملکرد مطلوبی به دست آید، بلکه کیفیت محصول نیز افزایش یابد. در این بین علاوه بر کاربرد بهینه عناصر پر مصرف، تغذیه با ریز مغذی‌ها به‌ویژه آهن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Sanz et al., 2002). آهن از جمله عناصر غذایی ضروری کم مصرف و نسبتاً غیرمتحرک است که به دلیل تحرک پایین، علائم کمبود آن ابتدا در برگ‌های جوان به حالت زردی نمایان می‌شود. با کمبود آهن، کلروفیل به مقدار کافی در برگ‌ها تشکیل نمی‌شود و به همین خاطر موجب کاهش تولید کربوهیدرات‌ها و افزایش رقابت بین رشد رویشی و زایشی می‌شود که نهایتاً منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌گردد (Marschner, 2011). اصلی‌ترین نشانه کمبود آهن در گیاهان کاهش فتوسنتز است. علاوه بر این، با کمبود آهن رنگ‌گیری میوه‌ها نیز دچار اختلال

می‌شود. به عنوان نمونه در درختان هلو، کمبود آهن با کاهش میزان کلروفیل و به دنبال آن با کاهش فتوسنتز، موجب دیر رس شدن و تأخیر در رنگ‌گیری میوه شده است (Alvares-Fernaandez et al., 2003).

افزون بر نقش کلیدی آهن در سیستم فتوسنتزی، این عنصر کوفاکتور یا جز ساختاری بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که کمبود آن منجر به کاهش قابل توجه فعالیت چندین سیستم آنزیمی نظیر سیتوکرم اکسیداز، فرودوکسین، زنجیره انتقال الکترون و برخی آنزیم‌ها در گیاهان می‌شود (Marschner, 2011; Tayefi-Nasrabadi et al., 2016; Gama et al., 2011). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در از بین بردن گونه‌های اکسیژن فعال (Reactive oxygen species)، مالون‌دی‌آلدئید و بازسازی سلول‌های تخریب شده نقش مثبت و موثری دارند (Esmaeilzadeh et al., 2016; Gama et al., 2004).

از مهم‌ترین آنزیم‌های دارای آهن برای مقابله با  $H_2O_2$  و MDA می‌توان به آنزیم‌های APX، CAT و POD اشاره کرد (Azooz et al., 2012). این آنزیم‌ها با تبدیل  $H_2O_2$  به آب، اکسیژن و ترکیبات فنولی سبب مهار یکی از مهم‌ترین گونه‌های اکسیژن فعال در سلول‌ها می‌شوند. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز یکی دیگر از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مهم است که با توجه به داشتن ترکیب آهن-سولفور در ساختارش، با فعالیت خود موجب کاهش محتوای  $H_2O_2$  در محصولات مختلف می‌شود. برای مثال، محلول‌پاشی آهن در توت‌فرنگی با افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم SOD باعث کاهش میزان  $H_2O_2$  شده است (Kaya et al., 2019). این نتایج در لیمو (Esmaeilzadeh et al., 2004) و میوه توت‌فرنگی رقم 'تولدا' (Amaliotis et al., 2002) نیز به اثبات رسیده است.

با توجه به مطالب بیان شده و تأثیرات مختلف کمبود آهن بر رشد و نمو گیاهان، بیشبود آن نیز اثرات منفی

فراوانی در عملکرد گیاهان به دنبال دارد. در همین رابطه محققان دریافته‌اند که با سمیت آهن تولید گونه‌های اکسیژن فعال نظیر  $H_2O_2$  بیشتر می‌شود که سبب آسیب به اسید نوکلئیک و تغییر بیان برخی ژن‌ها در گیاهان می‌گردد (Azooz et al., 2012).

نظر به اینکه آهن تأثیر مستقیمی در چرخه رشد و تنظیم پدیده‌های مختلف فیزیولوژیکی گیاهان دارد و از آنجایی که حرکت آن در داخل گیاه به کندی صورت می‌گیرد، به همین دلیل محلول‌پاشی کلات‌های حاوی آهن روش مؤثرتری در برطرف نمودن کمبود آن می‌باشد، چرا که این ترکیبات کمتر تحت تأثیر شرایط محیطی بوده و خیلی سریع‌تر در دسترس گیاه قرار می‌گیرند (Sanz et al., 2002). بنابراین، این پژوهش با هدف دستیابی به بهترین غلظت آهن جهت تسریع رسیدگی میوه و بهبود فتوسنتز و عملکرد آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی طی دوره رشد، نمو و رسیدن میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در یک گلخانه هیدروپونیک بخش خصوصی شهرک گلخانه‌ای شهر زنجان با مشخصات جغرافیایی  $16^{\circ}2'$  متر ارتفاع از سطح دریا، طول جغرافیایی  $48^{\circ}$  درجه و  $39'$  دقیقه، عرض جغرافیایی  $36^{\circ}$  درجه و  $71'$  دقیقه با میانگین دمای شبانه‌روز  $21^{\circ}$  درجه سلیسیوس، رطوبت نسبی  $50-60\%$  درصد و شدت نور  $3000-5000$  هزار لوکس در بهار سال  $1397$  بر روی میوه‌های توت‌فرنگی رقم کاماروسا در طول دوره رشد و نمو میوه اجرا شد. بوته‌های توت‌فرنگی کاملاً بالغ، سالم و عاری از هر گونه بیماری بودند. جهت مبارزه با آفات و بیماری‌ها به ترتیب از سم آبامکتین و اکسی‌کلرور مس استفاده شد و هرس برگ‌های پیر

و بیمار به طور دستی انجام گرفت. در حالت کلی رشد و نمو میوه توت‌فرنگی شامل چهار مرحله مختلف رشدی (توت سبز، سفید، صورتی و قرمز) است (Vallarino et al., 2015) که به منظور انجام آزمایش، بعد از انتخاب میوه‌های هم اندازه و به تعداد مناسب در مرحله اول رشد (توت سبز: تقریباً یک هفته بعد از تشکیل میوه)، بقیه گل‌ها و میوه‌ها حذف گردیدند.

به منظور تیمار میوه‌ها از ترکیب کلات آهن (Fe-EDTA) با نام تجاری فتریلون® (Fetrilon) و درجه خلوص  $14\%$  استفاده گردید. ابتدا در یک آزمایش مقدماتی جهت تعیین غلظت بهینه، محلول‌پاشی تمام غلظت‌های صفر -  $2000-4000-6000-8000-10000-12000-14000-16000$  و  $18000$  میکرومول بر لیتر ( $\mu\text{mol/L}$ ) بر بوته‌های توت‌فرنگی (در مرحله اول رشد میوه‌ها: توت سبز) اعمال گردید. محلول‌پاشی فقط یک مرتبه و در هر گیاه تقریباً به میزان  $40$  میلی‌لیتر در ساعات عصر انجام شد. سپس غلظت  $14000$  برای تیمار کلات آهن بر اساس نتایج گزارش شده توسط رضائی و همکاران (2019) جهت بررسی صفات بیوشیمیایی انتخاب گردیده و نمونه‌برداری از میوه‌ها انجام شد. در هر نوبت از نمونه‌برداری، میوه‌های برداشت شده بعد از قرار دادن در فویل آلومینیومی در ازت مایع منجمد و به فریزر  $80-$  درجه سلیسیوس آزمایشگاه پس از برداشت دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان منتقل شدند. در این پژوهش صفات کلروفیل a، کلروفیل b، فعالیت آنزیم‌های APX، CAT، POD، SOD، محتوای مالون‌دی-آلدئید و پراکسید هیدروژن، pH آب میوه و پروتئین محلول کل مورد سنجش قرار گرفتند.

## اندازه‌گیری صفات

برای اندازه‌گیری کلروفیل a و b ابتدا یک گرم از بافت برگ‌ها در هاون چینی با ده میلی‌لیتر استون  $80\%$  به خوبی کوبیده شده سپس در دستگاه سانتیفریوژ با سرعت  $6000$

یک میلی‌لیتر بافر استخراج (از ترکیب فسفات سدیم ۰/۱ مولار با  $\text{pH}=7$  با ۰/۲ درصد پلی وینیل پیرولیدین (Polyvinylpyrrolidone) بدست آمد) افزوده و مخلوط شد. پس از عبور از صافی، عصاره تهیه شده به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه و دمای چهار درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد. سپس محلول شفاف رویی به آرامی جدا گردید. از این محلول برای ارزیابی فعالیت آنزیم‌های CAT (Tayefi-Nasrabadi et al., 2011)، APX (Ghamsari et al., 2007)، POD (Peyvandi et al., 2012) و SOD (Toivonen and Sweeney, 1998) در نمونه‌های میوه توت‌فرنگی استفاده شد. میزان جذب عصاره‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر برای کاتالاز، در طول موج ۲۹۰ نانومتر برای آسکوربات پراکسیداز، در طول موج ۴۷۰ نانومتر برای پراکسیداز و در طول موج ۵۶۰ نانومتر برای سوپراکسید دیسموتاز قرائت شد و فعالیت ویژه آنزیم‌ها با استفاده از فرمول‌های مربوطه بر حسب میزان جذب هر واحد از میلی‌گرم پروتئین در هر دقیقه ( $\text{U mg}^{-1} \text{ protein}$ ) محاسبه گردید.

برای تعیین پروتئین کل، از روش (Toivonen and Sweeney, 1998) استفاده شد و اندازه‌گیری  $\text{pH}$  آب میوه‌ها مطابق با روش‌های استاندارد AOAC انجام و به صورت درصد تعیین گردید (AOAC, 2012). تجزیه و تحلیل داده‌ها با کمک نرم افزار SPSS<sub>ver 22</sub> و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت و ترسیم نمودارها به کمک نرم افزار Excel انجام شد.

### نتایج و بحث

طبق یافته‌های تجزیه واریانس داده‌ها اثر محلول‌پاشی آهن، زمان و اثر برهمکنش بین آنها در شاخص‌های کلروفیل a، کلروفیل b، پراکسید هیدروژن، مالون‌دی‌آلدئید، آنزیم‌های CAT، APX و POD معنی‌دار بود ولی در صفت

دور در دقیقه به مدت ده دقیقه قرار داده شد. عصاره بدست آمده از سانتریفیوژ را به بالن شیشه‌ای منتقل و مقداری از نمونه را در کووت اسپکتوفتومتر ریخته سپس مقدار جذب به طور جداگانه در طول موج‌های ۶۳۶ نانومتر برای کلروفیل a و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b توسط دستگاه اسپکتوفتومتر (Cecil.series2 ساخت انگلستان) قرائت شد. در نهایت با استفاده از فرمول‌های زیر میزان کلروفیل a و b بر حسب ( $\text{mg/g FW}$ ) نمونه به دست آمد (Lichtenthaler, 2001). در روابط زیر W حجم نهایی نمونه و V وزن تر نمونه است.

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{645}) V / 100W$$

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A_{645} - 3.6 \times A_{663}) V / 100W$$

جهت ارزیابی محتوای پراکسید هیدروژن بعد از تهیه عصاره نمونه‌ها، میزان جذب آنها در طول موج ۴۱۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. محتوی پراکسید هیدروژن با استفاده از  $\text{H}_2\text{O}_2$  به عنوان استاندارد محاسبه شده و به صورت میکرومول بر گرم بر حسب وزن تازه ( $\mu\text{mol g}^{-1} \text{ FW}$ ) بیان گردید (Heath and Packer, 1968).

اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدئید طبق تشکیل کمپلکس مالون‌دی‌آلدئید (MDA) ایجاد شده با تیوباربیتوریک اسید (TBA) انجام شد. بعد از تهیه عصاره، میزان MDA با اندازه‌گیری جذب در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر محاسبه و به صورت میکرومول بر گرم بر حسب وزن تازه ( $\mu\text{mol g}^{-1} \text{ FW}$ ) بیان گردید. ماده مورد نظر برای جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر ماده قرمز رنگ MDA-TBA بود و جذب سایر رنگیزه‌های غیراختصاصی در ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Heath and Packer, 1968).

به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، ابتدا عصاره آنزیمی تهیه شد. بدین منظور، ابتدا دو گرم از بافت میوه در حضور نیتروژن مایع در هاون چینی به خوبی آسیاب شد و مقدار ۰/۱ گرم آن به تیوب پلاستیکی حاوی

برگ‌های گیاه توت‌فرنگی رقم کاماروسا افزایش یافت. بر اساس نتایج پژوهشگران محدوده مناسب غلظت آهن موجود در برگ‌های توت‌فرنگی بین ۵۸ تا ۸۴۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (Elmer et al., Amaliotis et al., 2002; 1995) که در این آزمایش مقدار غلظت آهن موجود در برگ‌های بوته رقم کاماروسا قبل و بعد از محلول‌پاشی (با غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر) به ترتیب ۸۷ و ۱۷۶ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. به عبارت دیگر محلول‌پاشی آهن با غلظت انتخابی سبب افزایش غلظت درونی آهن در بوته‌های محلول‌پاشی شد.

طبق آنالیز آماری داده‌ها، محلول‌پاشی آهن با غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر، میزان کلروفیل‌های *a* و *b* را در گیاهان توت‌فرنگی رقم کاماروسا افزایش داد. در مورد تأثیر آهن بر تولید و تجمع کلروفیل نتایج مختلفی گزارش شده است، در همین رابطه بیان شده است که کاربرد کلات آهن در گیاه توت‌فرنگی رقم 'کوبین الیسا' موجب افزایش کلروفیل‌های *a* و *b* برگ در سطح معنی‌داری گردیده است (Spinelli et al., 2010). همچنین، محلول‌پاشی آهن به صورت کلاته، کلروفیل‌های برگ را در گیاه لوبیا به طور معنی‌داری افزایش داده است (Kong et al., 2014). این نتایج در گیاه ریحان (Peyvandi et al., 2011) و توت‌فرنگی ارقام 'تولدا' (Amaliotis et al., 2002) و 'چندلر' (Chaturvedi et al., 2003) نیز گزارش شده است. از طرفی دیگر کمبود آهن باعث کاهش کلروفیل و فتوسنتز می‌گردد. برای مثال در برگ اسفناج کمبود آهن از طریق کاهش انتقال ترکیبات فتوسنتزی از فتوسیستم نوری دو به فتوسیستم نوری یک موجب کاهش فتوسنتز می‌گردد. همچنین، کمبود آهن موجب می‌شود کلروفیل به مقادیر کافی در برگ‌ها تولید نگردد که به دنبال کاهش کلروفیل میزان فتوسنتز و ترکیبات فتوسنتزی نیز کاهش می‌یابد (Mohamadipoor et al., 2013). در گیاهان توت‌فرنگی نیز

SOD فقط اثر زمان آزمایش معنی‌دار شد. همچنین، pH آب میوه و پروتئین محلول کل معنی‌دار نشدند.

### میزان کلروفیل‌های *a*، *b* و رسیدگی میوه

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها، اختلاف معنی‌داری از نظر شاخص کلروفیل *a* در بوته‌های محلول‌پاشی شده با آهن نسبت به نمونه‌های شاهد در همه زمان‌های بررسی (روزهای سوم، ششم، نهم و دوازدهم آزمایش) مشاهده شد. در گیاهان محلول‌پاشی شده با آهن نیز در مقایسه با یکدیگر، تنها نوبت اول بررسی (روز سوم) با دیگر نوبت‌های آزمایش (روزهای ششم، نهم و دوازدهم) اختلاف معنی‌داری داشتند ولی در بقیه نوبت‌های نمونه‌برداری (روزهای ششم، نهم و دوازدهم) اختلاف معنی‌داری نسبت به یکدیگر یافت نشد. همچنین، نتایج نشان داد صفت کلروفیل *a* در برگ‌های گیاهان شاهد در مقایسه با یکدیگر بجز نوبت سوم آزمایش (روز نهم) با سه نوبت بررسی دیگر (روزهای سوم، ششم و دوازدهم) در بقیه زمان‌های نمونه‌برداری تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل الف-۱).

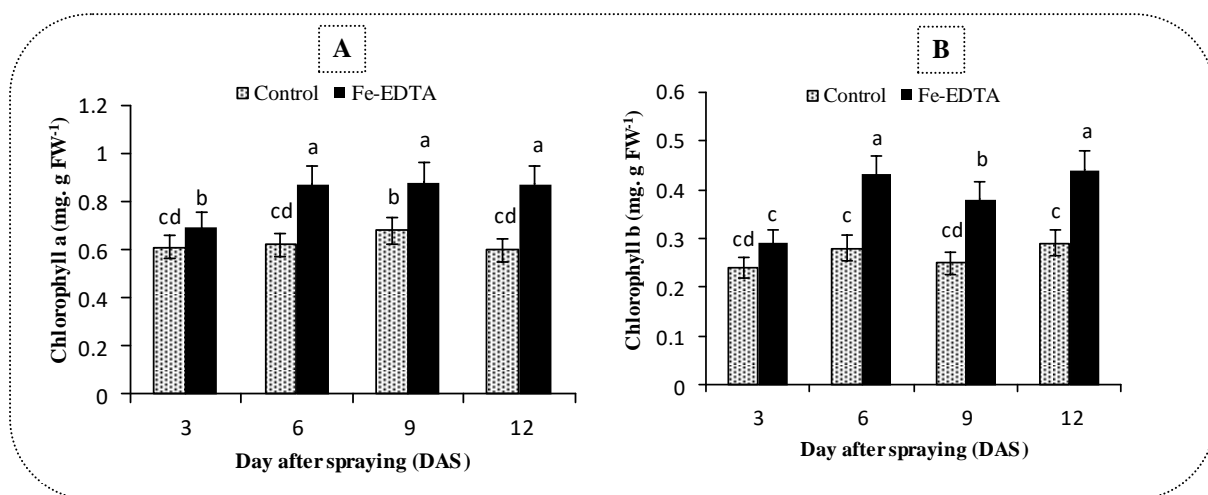
با گذشت شش روز از زمان محلول‌پاشی میزان کلروفیل *b* در برگ‌های تیمار شده با آهن افزایش چشمگیری نشان داد. طبق مقایسه میانگین داده‌ها مشخص گردید، شاخص کلروفیل *b* در بوته‌های محلول‌پاشی شده با آهن در مقایسه با یکدیگر در همه نوبت‌های نمونه‌برداری بجز نوبت دوم با چهارم آزمایش (روز ششم و دوازدهم) تفاوت معنی‌داری نشان داد در حالی که نسبت به نمونه‌های شاهد فقط در نوبت اول بررسی (روز سوم آزمایش) این اختلاف معنی‌دار نشد. در گیاهان شاهد نیز در هیچ یک از مراحل نمونه‌برداری نسبت به یکدیگر از نظر شاخص کلروفیل *b* تفاوت معنی‌داری یافت نشد (شکل ب-۱).

با محلول‌پاشی آهن میزان غلظت کلروفیل‌های *a* و *b* در

عنوان جزئی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا که در فتوسنتز، تنفس و تثبیت نیتروژن نقش دارند، نقش مهمی دارد (Marshner, 2011). در نتیجه دلیل افزایش کلروفیل‌های a و b در گیاهان محلول‌پاشی شده را می‌توان به افزایش آهن درونی گیاه و پاسخ مناسب واکنش‌های شیمیایی مرتبط با تولید کلروفیل‌ها ربط داد.

با کمبود آهن غلظت کلروفیل در برگ‌ها کاهش یافته و میزان فتوسنتز تحت تاثیر آن قرار گرفته است (Gama et al., 2016).

آهن اگرچه بخشی از مولکول کلروفیل نیست اما پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نیاز به آهن احتمالا، مربوط به نیاز عمومی برای این عنصر برای تولید و ساخت اجزای کلروپلاست و به‌ویژه انتقال الکترون است. این عنصر به

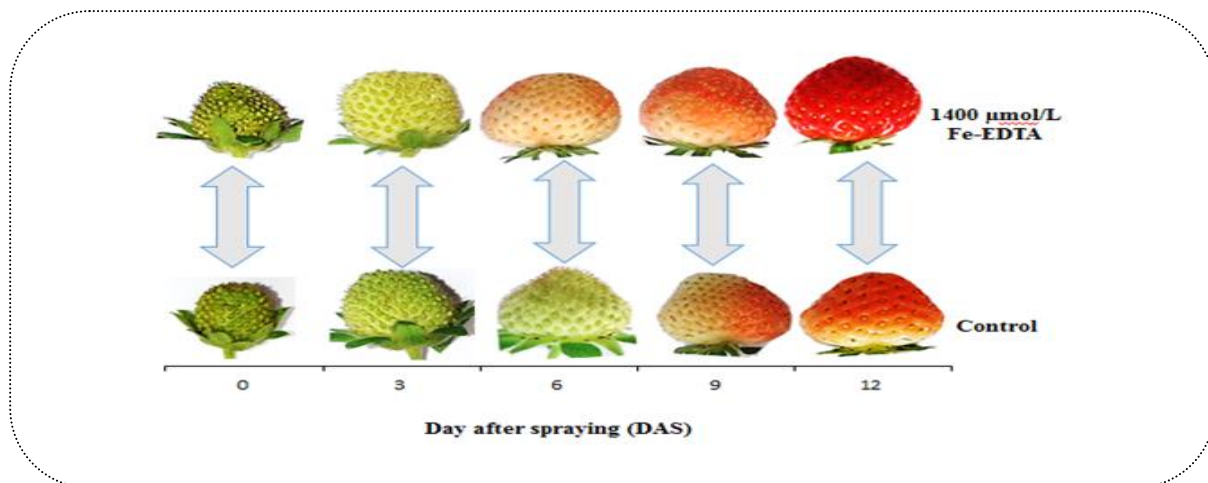


شکل ۱. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر کلروفیل a (الف) و کلروفیل b (ب) در برگ‌های توت‌فرنگی طی مراحل نمو (A) and chlorophyll b (B) in strawberry Figure 1. The effect of iron concentration (1400 µmol/L) on chlorophyll a leaves during developmental stages

نمو میوه کمک می‌کند (Alvarez-Fernandez et al., 2003).

افزون بر این، پژوهشگران بین غلظت آهن و عملکرد گیاهان توت‌فرنگی رابطه مستقیمی را به اثبات رسانده‌اند؛ بدین ترتیب که با مصرف آهن، میزان کلروفیل، فتوسنتز و رشد رویشی این گیاهان افزایش یافته که در نهایت موجب افزایش میزان کربن‌گیری و بیشتر شدن مقدار ماده خشک تولیدی گیاه می‌شود (Amaliotis et al., 2002). در نتیجه، بهبود رنگ‌گیری و تسریع رسیدگی میوه‌های رقم کاماروسا در اثر محلول‌پاشی آهن را می‌توان به دلیل افزایش کارایی کلروفیل a، b و تغذیه بهتر میوه‌ها به عنوان مهم‌ترین مخازن جذب کربوهیدرات‌ها مرتبط دانست.

علاوه بر این موارد، همانطور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود تغذیه برگ‌های آهن علاوه بر افزایش کلروفیل برگ‌های رقم کاماروسا، باعث تسریع رنگ‌گیری و رسیدگی میوه‌ها در مطالعه حاضر شد. از آنجایی که آهن جهت ساخت پروتئین‌هایی که پیش نیاز ساخت کلروفیل هستند، مورد نیاز است، در نتیجه کمبود آن باعث کاهش میزان کلروفیل و کاهش فتوسنتز گیاهان می‌شود (Marshner, 2011). طبق مطالعات، در ارقام 'کارسون' و 'گولد' میوه هلو با کاربرد آهن تراکم کلروفیل‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و به دنبال آن با بیشتر شدن تولید کربوهیدرات‌ها، انتقال این ترکیبات از برگ‌ها به میوه‌ها تحریک می‌شود که به این ترتیب به بهبود رشد و



شکل ۲. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن در تسریع رسیدن میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو

Fig 2. The influence of iron concentration (1400 µmol/L) on acceleration of strawberry fruit ripening during developmental stages

روی توت‌فرنگی رقم 'پاروس' انجام دادند، بیان نمودند که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تاثیر کاربرد آهن افزایش یافته است (Zaerei and Sarikhani, 2016). که همسو با نتایج پژوهش حاضر است. افزایش فعالیت کاتالاز در اثر اعمال آهن در آرابیدوپسیس (Cook et al., 2004) و ریحان (Peyvandi et al., 2011) نیز مشاهده شده است.

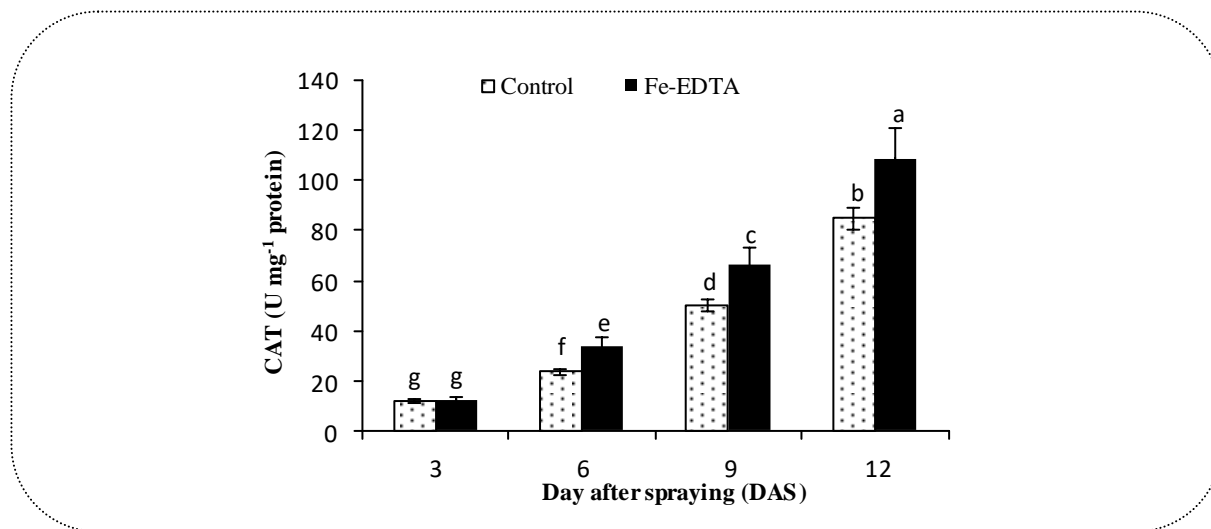
از دلایل اصلی افزایش فعالیت آنزیم CAT وجود آهن بعنوان کوفاکتور یا جز ساختاری این آنزیم می‌باشد، بطوری که با افزایش میزان غلظت آهن در داخل گیاه، فعالیت این آنزیم هم افزایش می‌یابد (Zaerei and Sarikhani, 2016)، از دلایل دیگر افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز می‌توان به همبستگی مثبت بین فعالیت آنزیم پراکسیداز با فعالیت کاتالاز (Kong et al., 2014) اشاره کرد به نحوی که فعالیت هر دو آنزیم ذکر شده در این تحقیق نیز به طور مشابه افزایش نشان داد. همچنین، افزایش میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را می‌توان به دلیل افزایش میزان  $H_2O_2$  در طول دوره رسیدن میوه عنوان کرد (Kong et al., 2014). بر اساس نتایج این پژوهش، فعالیت آنزیم CAT مشابه با روند افزایش میزان  $H_2O_2$  افزایش یافت.

#### کاتالاز

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، اختلاف معنی‌داری در میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن در همه نوبت‌های نمونه‌برداری (روزهای سوم، ششم، نهم و دوازدهم بررسی) نسبت به یکدیگر از نظر فعالیت آنزیم CAT مشاهده شد ولی در مقایسه با نمونه‌های شاهد فقط در زمان اول بررسی تفاوت معنی‌داری یافت نشد. میزان فعالیت آنزیم CAT در میوه‌های شاهد نیز نسبت به یکدیگر در نوبت‌های مختلف آزمایش (روزهای سوم، ششم، نهم و دوازدهم) تفاوت معنی‌داری نشان داد. همچنین، با اعمال آهن بیشترین و کمترین اختلاف فعالیت آنزیم CAT نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب در نوبت چهارم و نوبت اول بررسی مشاهده گردید که نشان دهنده تاثیر آهن در مراحل نزدیک به رسیدن میوه‌های رقم کاماروسا بود (شکل ۳).

کاتالاز آنزیمی آهن‌دار است که در تمام یوکاریوت‌ها وجود دارد. این آنزیم یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌باشد که به همراه دیگر آنزیم‌ها در سمیت‌زدایی ROSها نقش دارد. در بررسی که پژوهشگران





شکل ۳. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو  
 Figure 3. The effect of iron concentration (1400  $\mu\text{mol/L}$ ) on catalase enzyme activity in strawberry fruit during developmental stages

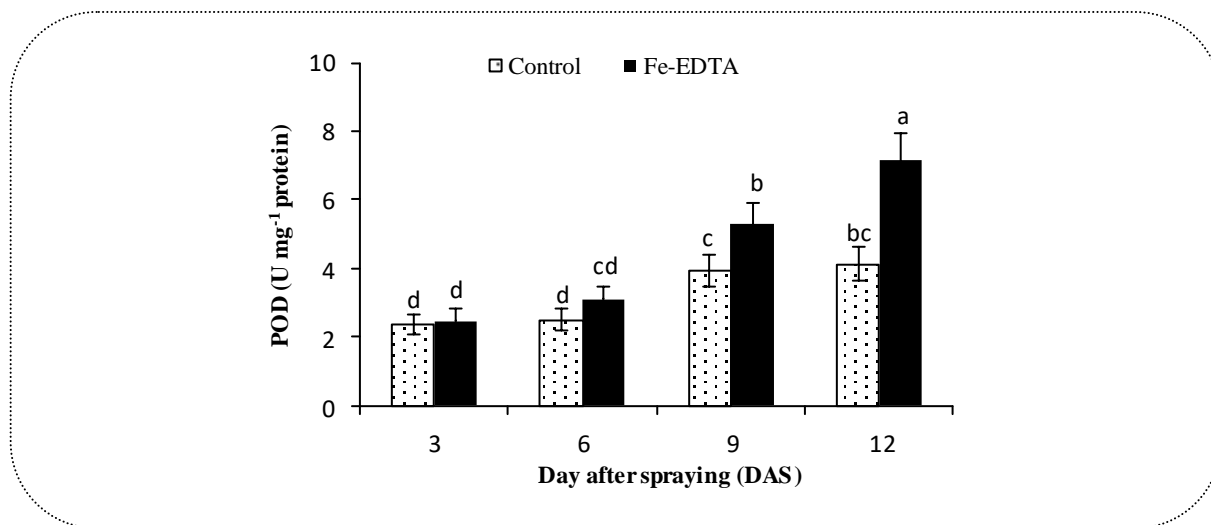
کننده  $\text{H}_2\text{O}_2$  عمل می‌کند (Blakrishman et al., 2000). در پژوهش حاضر میزان فعالیت آنزیم POD همانند آنزیم کاتالاز در طول دوره رسیدن میوه رقم کاماروسا افزایش یافت. در پژوهش‌های مشابه نیز مشخص گردید که تیمار آهن در موز رقم 'کاوندیش' (Blakrishman et al., 2000)، مرزه (Peyvandi et al., 2012) و توت‌فرنگی رقم 'پاروس' (Zaerei and Sarikhani, 2016) موجب افزایش چشمگیر فعالیت POD شده بود.

وجود آهن در بخش ساختاری آنزیم پراکسیداز از دیگر دلایل اصلی افزایش فعالیت این آنزیم می‌باشد که با بیشتر شدن غلظت قابل جذب آهن در درون گیاه میزان فعالیت این آنزیم نیز بیشتر می‌گردد (Azooz et al., 2012). از دلایل بعدی افزایش فعالیت این آنزیم در طی مراحل مختلف نمو و رسیدن، می‌توان به افزایش رادیکال‌های آزاد نظیر پراکسید هیدروژن نسبت داد که در جهت تخریب غشا و سلول‌ها عمل می‌کنند. از این رو با نزدیک شدن به مرحله رسیدن میزان فعالیت آنزیم POD نیز افزایش یافته و با سمیت‌زدایی ROSها، مقاومت گیاهان را نسبت به این ترکیبات افزایش داده است.

#### گایاکول پراکسیداز

طبق مقایسه میانگین‌ها، میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن در مقایسه با یکدیگر در همه نوبت‌های بررسی بجز نوبت اول (روز سوم) با نوبت دوم (روز ششم) آزمایش از نظر فعالیت آنزیم POD اختلاف معنی‌داری داشتند. از نظر میزان فعالیت آنزیم POD در میوه‌های تیمار شده با آهن نسبت به نمونه‌های شاهد، فقط بین نوبت سوم (روز نهم) با نوبت چهارم (روز دوازدهم) بررسی تفاوت معنی‌داری وجود داشت در حالی که در بقیه نوبت‌ها اختلاف معنی‌داری دیده نشد. در میوه‌های شاهد نیز نسبت به یکدیگر بین نوبت‌های اول و دوم با نوبت‌های سوم و چهارم بررسی از نظر فعالیت آنزیم POD اختلاف معنی‌داری مشاهده شد ولی بین نوبت اول با نوبت دوم و نوبت سوم با نوبت چهارم بررسی اختلاف معنی‌داری یافت نشد (شکل ۴).

آنزیم POD تعداد زیادی از ترکیبات آلی مانند فنول‌ها، آمین‌های معطر و هیدروکینون‌ها را اکسید می‌کند. این پروتئین دارای آهن در سنتز لیگنین نیز نقش دارد. همچنین، در مقابله با استرس‌های محیطی به عنوان مصرف



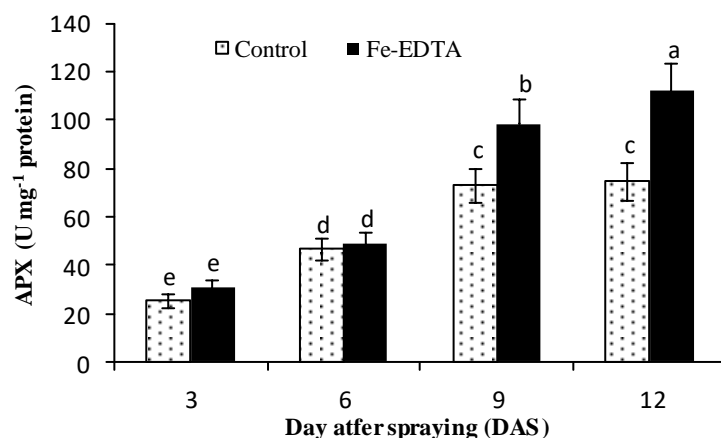
شکل ۴. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر میزان فعالیت آنزیم‌ها پراکسیداز در میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو  
Figure 4. The effect of iron concentration (1400 μmol/L) on peroxidase enzyme activity in strawberry fruit during developmental stages

#### آسکوربات پراکسیداز

گیاهان برای حفاظت در برابر خسارت اکسیداتیو به یک سیستم جاروب‌کننده رادیکال‌های آزاد مجهز هستند که از این میان می‌توان به اسید آسکوربیک اشاره کرد (Fatahi Moghadam et al., 2019). اسید آسکوربیک به عنوان یک آنتی‌اکسیدان مهم گیاهی می‌تواند با انواع اکسیژن‌های آزاد ترکیب شده و در مواقع لزوم از خود واکنش نشان دهد (Esmailzadeh et al., 2010). افزایش فعالیت آنزیم APX نیز به مانند آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز بر اثر افزایش H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌باشد که با فعال کردن مسیرهای پیام‌رسان باعث افزایش بیان ژن‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Lurie, 2003).

یافته‌های محققان حاکی از آن است که تیمار کلات آهن در افزایش فعالیت آنزیم‌های APX و کاتالاز در توت‌فرنگی رقم 'چندلر' (Chaturvedi et al., 2003) و مرزه (Peyvandi et al., 2012) تاثیر مثبت داشته است. در تایید با نتایج این پژوهش، کمبود آهن موجب کاهش فعالیت آنزیمی‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز در میوه توت‌فرنگی رقم 'کاماروسا' شده است (Kaya and Ashraf, 2019).

بر پایه یافته‌های مقایسه میانگین‌ها، میزان فعالیت آنزیم APX تمامی میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن در طول زمان‌های مختلف آزمایش (روزهای سوم، ششم، نهم و دوازدهم) در مقایسه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نشان دادند به طوری که میزان فعالیت آنزیم APX در نوبت چهارم بررسی به طور معنی‌داری بیشتر از نوبت سوم بررسی، در نوبت سوم بررسی به طور معنی‌داری بیشتر از نوبت دوم بررسی و در نهایت در نوبت دوم بررسی به طور معنی‌داری بیشتر از نوبت اول آزمایش بود. جالب توجه بود که فعالیت آنزیم APX میوه‌های محلول‌پاشی شده در نوبت‌های سوم و چهارم بررسی نسبت به نوبت‌های اول و دوم افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت. طبق نتایج، میزان فعالیت APX در میوه‌های تیمار شده با آهن در مقایسه با نمونه‌های شاهد، فقط در نوبت‌های سوم و چهارم بررسی اختلاف معنی‌داری نشان دادند در حالی که در نوبت‌های اول و دوم آزمایش اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. در میوه‌های شاهد نیز از نظر فعالیت APX به غیر از نوبت سوم با نوبت چهارم بررسی بقیه نوبت‌های بررسی نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند (شکل ۵).



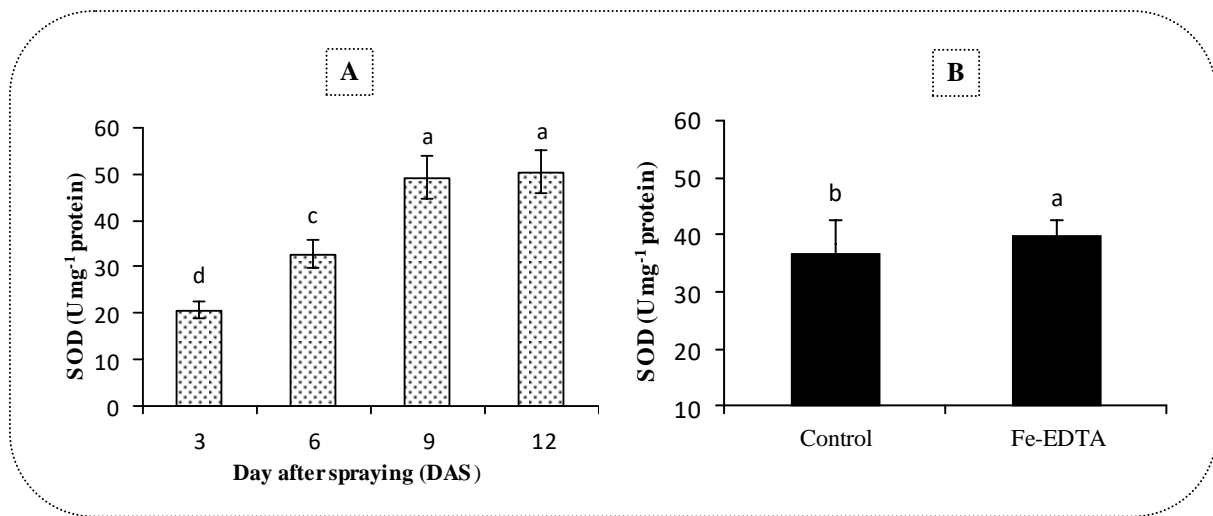
شکل ۵. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو  
 Figure 5. The effect of iron concentration (1400 μmol/L) on ascorbate peroxidase enzyme activity in strawberry fruit during developmental stages

### سوپراکسید دیسموتاز

افزایش نشان داد (شکل ب- ۶).

در هر جایگاهی که زنجیره انتقال الکترون رخ می‌دهد سوپراکسید نیز تولید می‌شود. در قسمت‌های مختلف سلول مثل میتوکندری، کلروپلاست، پراکسی‌زوم، سیتوسل و آپوپلاست انواع متفاوتی از آنزیم SOD دیده شده است. مهم‌ترین و اولین آنزیم آنتی‌اکسیدانی در تمام موجودات هوازی SOD است که در کاهش مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن نقش دارند (Tejera et al., 2006). آنزیم SOD یکی از اصلی‌ترین آنزیم‌های سلول‌ها می‌باشد که می‌تواند باعث تبدیل رادیکال سوپراکسید به پراکسید هیدروژن شود. سپس پراکسید هیدروژن می‌تواند توسط آنزیم آسکوربات پراکسیداز (که در سیکل آسکوربات-گلوتاتیون در کلروپلاست عمل می‌کند) یا توسط پراکسیداز (در دیواره سلولی و سیتوپلاسم) به آب و اکسیژن مولکولی تجزیه گردد (Peyvandi et al., 2012).

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات ساده زمان بررسی و محلول‌پاشی آهن بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار شد ولی اثر متقابل محلول‌پاشی آهن و زمان آزمایش معنی‌دار نشد. با بررسی میانگین داده‌ها مشخص گردید میزان فعالیت آنزیم SOD در طول دوره رشد و نمو میوه‌های رقم کاماروسا افزایش یافت. به طوری که کمترین و بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب در نوبت‌های اول ( $U\ mg^{-1}$  protein) و چهارم بررسی ( $20/65\ U\ mg^{-1}\ protein$ ) بدست آمد هر چند که تفاوت معنی‌داری بین مرحله سوم ( $49/34\ U\ mg^{-1}\ protein$ ) و چهارم بررسی مشاهده نشد (شکل الف- ۶). همچنین طبق مقایسه میانگین‌ها، با محلول‌پاشی غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن میزان فعالیت آنزیم SOD نسبت به نمونه‌های شاهد



شکل ۶. مقایسه میانگین اثرات ساده تاثیر زمان‌های مختلف (الف) و محلول‌پاشی غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن (ب) بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو

Figure 6. Main effects of different times (A) and iron concentration (1400  $\mu\text{mol/L}$ ) (B) on superoxide dismutase enzyme activity in strawberry fruit during developmental stages

شده با آهن در طول دوره آزمایش نسبت به میوه‌های شاهد تنها در زمان اول نمونه‌برداری از نظر میزان MDA اختلاف معنی‌داری نشان نداد ولی با طی روند رشد و نمو میوه‌ها بین زمان‌های دوم، سوم و چهارم آزمایش اختلاف معنی‌داری مشاهده شد، هر چند که این اختلاف در زمان پایانی آزمایش (نوبت چهارم بررسی) نمایان‌تر بود. در میوه‌های شاهد نیز بین همه زمان‌های بررسی در مقایسه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری از نظر میزان MDA وجود داشت (شکل ب-۷).

کاهش میزان  $\text{H}_2\text{O}_2$  و MDA در میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن جالب توجه بود به طوری‌که در طول دوره رشد، نمو و رسیدن میوه‌ها، با تاثیرگذاری آهن محلول‌پاشی شده، از میزان  $\text{H}_2\text{O}_2$  و MDA میوه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد بیشتر کاسته شد که در زمان آخر آزمایش (نوبت چهارم بررسی) چشمگیرتر بود.

ROSها و MDA از محصولات ثانویه اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع هستند که به عنوان شاخص پراکسیداسیون غشا شناخته می‌شوند. با رشد و نمو میوه‌ها،

#### محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید

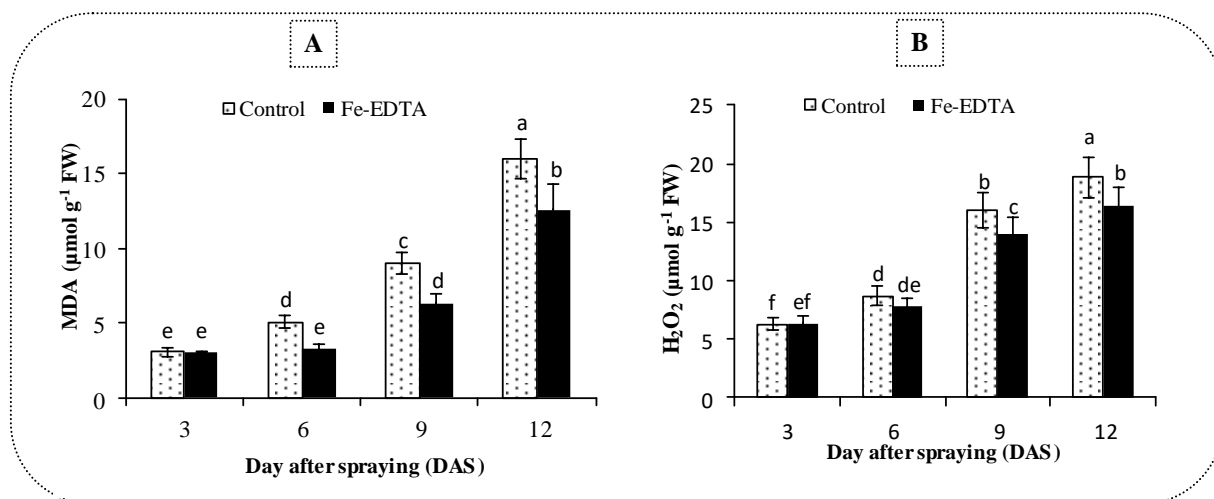
ختمقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن بین نوبت‌های اول و دوم بررسی نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری از نظر میزان  $\text{H}_2\text{O}_2$  وجود نداشت ولی تفاوت بین نوبت‌های دوم، سوم و چهارم آزمایش در مقایسه با یکدیگر معنی‌دار شد. همچنین، در نمونه‌های تیمار شده با آهن در نوبت‌های اول و دوم بررسی در مقایسه با نمونه‌های شاهد از نظر میزان  $\text{H}_2\text{O}_2$  اختلاف معنی‌داری یافت نشد در حالی که در میوه‌های محلول‌پاشی شده با آهن در مقایسه با میوه‌های شاهد بین نوبت‌های سوم و چهارم آزمایش تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در نمونه‌های شاهد نیز نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری از نظر میزان  $\text{H}_2\text{O}_2$  مشاهده شد (شکل الف-۷).

طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، میوه‌های تیمار شده با آهن از نظر میزان MDA به غیر از زمان اول با زمان دوم در همه زمان‌های بررسی در مقایسه با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. علاوه بر این، میوه‌های محلول‌پاشی

آنتی‌اکسیدانی، رادیکال‌های آزاد از جمله  $H_2O_2$  را خنثی می‌کند که با یافته‌های پژوهشی که بر روی گیاه فلفل (Korkmaz et al., 2012) و توت‌فرنگی (Pestana et al., 2013) انجام شده بود در یک راستا قرار دارد. بنابراین، طبق یافته‌های حاصل از اندازه‌گیری  $H_2O_2$ ، MDA این تحقیق و نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که دلیل کاهش محتوای  $H_2O_2$  و MDA افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به ویژه SOD، CAT و POD می‌باشد. در کل طبق نتایج بدست آمده از این بررسی، نقش آهن در فرآیندهای مختلف رشد و نمو رقم کاماروسا و فعالیت آنزیم‌ها به طور شماتیک و خلاصه در شکل (۸) آورده شده است.

ساختار غشا دچار تغییراتی می‌شود که ترکیباتی نظیر ROSها و MDA موجب تخریب غشا می‌گردند (Luo et al., 2015). در همین راستا پژوهشگران عنوان کردند که کمبود آهن باعث خسارت اکسیداتیو و تجمع بیشتر  $H_2O_2$  و MDA در نعناع (Askary et al., 2017) و توت‌فرنگی رقم 'کاماروسا' می‌شود (Kaya and Ashraf, 2019). طبق رابطه (۱) اگر غلظت آهن موجود در گیاهان در حد بهینه باشد با گونه‌های فعال اکسیژن ( $H_2O_2$  و  $O_2^-$ ) ترکیب شده و با تبدیل آنها به ترکیبات دیگر موجب کاهش اثرات سو آنها می‌گردد (Marshner, 2011).

رابطه (۱)  $O_2^- + H_2O_2 \xrightarrow{Fe} O_2 + OH^- + OH^-$   
 همچنین، آهن با افزایش فعالیت آنزیم‌های



شکل ۷. تاثیر غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن بر محتوای پراکسید هیدروژن (الف) و مالون‌دی‌آلدنید (ب) در میوه توت‌فرنگی طی مراحل نمو

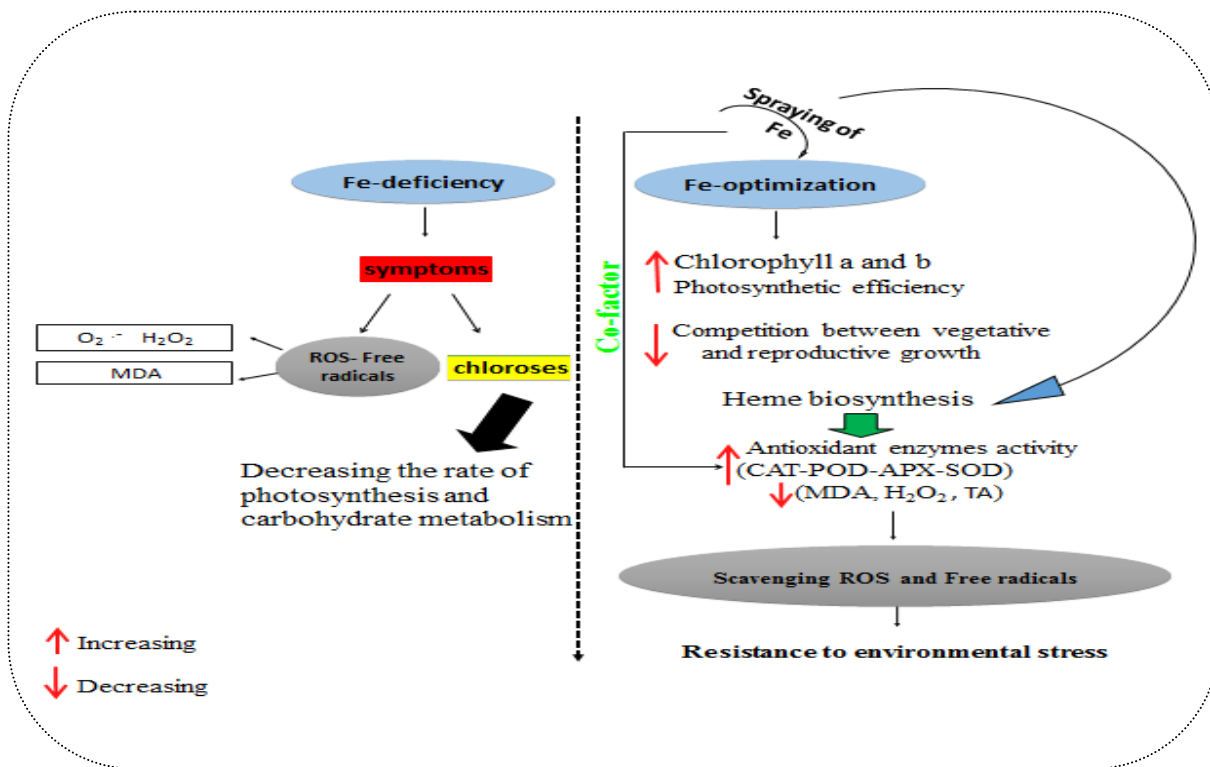
Figure 7. The effect of iron concentration (1400 μmol/L) on  $H_2O_2$  (A) and MDA (B) content in strawberry fruit during developmental stages

افزایش درونی آهن در گیاه، میزان فتوسنتز و متابولیسم گیاه افزایش می‌یابد که افزایش تولید کربوهیدرات‌ها را به دنبال دارد (Malakouti and Tabatabaei, 1999). همچنین، با بهینه بودن غلظت آهن در گیاه میزان رقابت رشد رویشی و زایشی کاهش یافته و در نهایت گیاه رشد و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد (Marschner, 2011) که حتی

شکل ۸- در صورت کمبود آهن علائم آن ابتدا به صورت زردی برگ‌ها و کاهش میزان کلروفیل نمایان می‌شود که به دنبال آن با کاهش نرخ فتوسنتز و کاهش متابولیسم کربوهیدرات‌ها، رشد و عملکرد گیاه پایین می‌آید (Marschner, 2011). تولید ROSها نیز از دیگر علائم کمبود آهن می‌باشد. ولی در مقابل با محلول‌پاشی آهن و

دخیل در سیستم آنتی‌اکسیدانی می‌گردد که در از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد نقش اساسی دارند (Gama et al., 2016).

به تسریع رسیدگی محصول منجر می‌شود (شکل ۲). علاوه بر این‌ها، با بهینه بودن غلظت آهن، بیوستت ترکیبات دارای هم نیز افزایش می‌یابد که موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های



شکل ۸- نقش آهن در فرآیندهای مختلف رشد و نمو میوه توت‌فرنگی

Figure 8- The role of iron in strawberry fruit developmental and growth various processes

pH آب میوه و پروتئین محلول کل اثر معنی‌داری نداشت. بنابراین، با انتخاب غلظت بهینه آهن می‌توان با تسریع رسیدگی میوه رقم کاماروسا، امکان عرضه زودتر محصول به بازار را فراهم آورد.

### سپاس‌گزاری

بدین وسیله از مدیریت محترم گلخانه جناب آقای مهندس امیر روح رز که در اجرای این پژوهش یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

آهن دارای اثرات مشهودی بر سیستم آنتی‌اکسیدانی و کیفیت میوه توت‌فرنگی است. کاربرد برگی آهن و تاثیر آن بر خصوصیات میوه توت‌فرنگی به غلظت و روش کاربرد آن بستگی دارد. در این پژوهش محلول‌پاشی غلظت ۱۴۰۰ میکرومول بر لیتر آهن با افزایش غلظت آهن درونی گیاه باعث تسریع رسیدگی میوه شد. طبق نتایج، اثر این غلظت بر میزان کلروفیل a و کلروفیل b، مالون‌دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن، آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار شد ولی بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز،

## منابع

- Alvares-Fernaandez, A., Paniagua, P., Abadia, J. and Abadia, A. 2003. Effects of Fe deficiency chlorosis on yield and quality in peach (*Prunus persica* L. Batsch). Journal of Agriculture and Food Chemistry. 51(19): 5738-5744.
- Amaliotis, D., Velemis, D., Bladenopoulou, S. and Karapetsas, N. 2002. Leaf nutrient levels of strawberries (cv. Tudla) in relation to crop yield. Acta Horticulture. 567: 447-450.
- AOAC. Latimer, G.E. and Horwitz, W. 2012. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists. International (19 th ed.) Canada.
- Asadi Gharneh, H.A., Arzani, K., Shojaeiyan, A., Golparvar, A.R. and Sabaghnia, N. 2015. Evaluation of genetic diversity in some strawberry (*Fragaria×annanasa* Duch.) cultivars in Iran using morphological characteristics. Plant Productions. 37(4): 93-106.
- Askary, M., Talebi, S.M., Amini, F. and Bangan. A.D.B. 2017. Effects of iron nanoparticles on *Mentha piperita* L. under salinity stress. Biology. 63: 65-75.
- Azooz, M.M., Fredan, F. and Abou-Elhamd. 2012. Biphasic effect of copper and iron on growth, proline, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum sativum* cv. Hasaawi) at early growing stage. Australian Journal of Crop Science. 6(4): 688-694.
- Blakrishman, K. 2000. Peroxidase activity as an indicator of the iron deficiency banana. Journal Plant Physiology. 5: 389-391.
- Chaturvedi, O.P., Singh, A.K., Tripathi, V.K. and Dixit, A.K. 2003. Effect of zinc and iron on growth, yield and quality of strawberry cv. Chandler. In VII International Symposium on Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics. 696(2): 237-240.
- Cook, D.S., Fowler, A. and Fiehn, O. 2004. A prominent role for the CBF cold response pathway in configuring the low temperature metabolome of Arabidopsis. Journal of Plant Biology. 101: 15-8.
- Elmer, W.H. and LaMondia J.A. 1995. The influence of mineral nutrition on strawberry black root. Advances in Strawberry Research. 14: 42-48.
- Esmaeilzadeh, K., Riahi-Madvar, A. and Maziyar. M. 2004. Antioxidant enzymes activity and anthocyanin content in Fe<sup>2+</sup> treated Lemon Balm Seedlings. International Journal of Farming and Allied Science. 3(5): 562-565.
- Fatahi Moghadam, J., Hashempour, H. and Fifaei, R. 2019. Improving quality and antioxidant characteristics of pulp and peel of citrus during storage by pre-Harvest spray of calcium chloride on fruit. Plant Productions. 42(1): 1-14. [In Farsi]
- Gama, F., Saavedra, T., Da Silva, J.P., Miguel, M.G., de Varennes, A., Correia, P.J. and Pestana, M. 2016. The memory of iron stress in strawberry plants. Plant Physiology and Biochemists. 104: 36-44.
- Ghamsari, L., Keyhani, E. and Golkhoo, S. 2007. Kinetics properties of guaiacol peroxidase activity in *Crocus sativus* L. corm during rooting. Iranian Biomedical Journal. 11(3): 137-146. [In Farsi]
- Ghasemi, K., Ghajar Sepanlou, M. and Hadadinezhad, M. 2019. Effect of silicon on nutrient concentration, photosynthetic pigments and fruit quality of strawberry cv. Camarosa. Horticultural Plant Nutrition. 2(1): 85-98. [In Farsi]
- Heath, R. and Packer, L. 1968. Photo-peroxidation in isolated chloroplasts, Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Biochemistry and Biology physiology. 125: 189-198.

- Kava, C. and Ashraf, M. 2019. The mechanism of hydrogen sulfide mitigation of iron deficiency-induced chlorosis in strawberry (*Fragaria×ananassa*) plants. *Protoplasma*. 256(2): 371-382.
- Kava, C., Akram, N.A. and Ashraf, M. 2019. Influence of exogenously applied nitric oxide and iron on strawberry (*Fragaria×ananassa*) plants grown under iron deficiency and/or saline stress. *Physiologia plantarum*. 165(2): 247-263.
- Kong, J., Dong, Y., Xu, L., Liu, S. and Bai, X. 2014. Effects of foliar application of salicylic acid and iron in alleviating iron deficiency induced chlorosis of *Arachis hypogaea* L. *Botanical studies*. 55(1): p 9.
- Korkmaz, A., Şirikçi, R., Kocaçınar, F., Değer, Ö. and Demirkıran, A.R. 2012. Alleviation of salt-induced adverse effects in pepper seedlings by seed application of glycine betaine. *Science horticulture*. 148: 197-205.
- Lichtenthaler, H.K. and Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry*. 1(1): F4-3.
- Luo, Z., Li, D., Du, R. and Mou, W. 2015. Hydrogen sulfide alleviates chilling injury of banana fruit by enhanced antioxidant system and proline content. *Science Horticulture*. 183: 144-151.
- Lurie, S. 2003. Antioxidants. *Postharvest oxidative stress in horticultural crops*. Food Products Press. New York, USA. pp, 131–150.
- Malekzadeh, P., Khara, J. and Heidari, R. 2014. Alleviating effects of exogenous Gamma-amino butiric acid on tomato seedling under chilling stress. *Journal of Physiology and Molecular Biology of Plant*. 20 (1): 133-137.
- Marschner, H., 2011. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic press. New York, 889 p.
- Miri, S.M., Hosseini, M., Souri, M.K. and Abasspour, S. 2017. Effect of potassium nitrate, iron and phenyl phthalamic acid on some of quantitative and qualitative characteristics of strawberry 'Gaviota'. *Plant Productions*. 39(4): 43-52. [In Farsi]
- Mohamadipoor, R., Sedaghatoor, S. and Khomami, A.M. 2013. Effect of application of iron fertilizers in two methods 'foliar and soil application' on growth characteristics of *Spathyphyllum illusion*. 3(1): 232-239.
- Pestana, M., Correia, P.J., Saavedra, T., Gama, F., Dandlen, S., Nolasco, G., Varennes, A.D. 2013. Root ferric chelate reductase is regulated by iron and copper in strawberry plants. *Plant Nutrition*. 36: 2035-2047.
- Peyvandi, M., Parandeh, H. and Mirza, M. 2011. Comparison of Nano Fe Chelate with Fe Chelate Effect on Growth Parameters and Antioxidant Enzymes Activity of *Ocimum Basilicum*. *New Cell Molecule Biotechnology*. 1(4): 89-98.
- Peyvandi, M., S. Pirghayesh, F., Nematpour and Ghorbanli, M. 2012. Antioxidant enzyme activity in response to iron and copper in *Cuminum cyminum* L. *Iranian Journal of Plant Physiology*. 3: 605 - 609. [In Farsi]
- Rezaei, S., Amiri, M.E., Bahari, A., Razavi, F. and Soleimani Aghdam, M. 2019. Impact of iron chelate on phenylalanine ammonia lyase enzyme activity and antioxidant properties of strawberry 'kamarossa' fruit during developmental stages. *Horticultural Plant Nutrition*. 2(2): 15-33. [In Farsi]
- Sanz, M., Cavero, J. and Abadia, J. 2002. Iron chlorosis in the Ebro river basin, Spain. *Journal of Plant Nutrition*. 15: 1971-1981.
- Spinelli, F., Fiori, G., Noferini, M., Sprocatti, M. and Costa, G., 2010. A novel type of seaweed extract as a natural alternative to the use of iron chelates in strawberry production. *Scientia horticulturae*. 125(3): 263-269.
- Tayefi-Nasrabadi, H., Dehghan, G., Daeihassani, B., Movafegi, A. and Samadi, A. 2011. Some biochemical properties of catalase from safflower (*Carthamus tinctorius* L. cv. M-CC-190). *African Journal of Agricultural Research*. 6(23): 5221-5226.



Tejera, N.A., Soussi, M. and Lluch, C. 2006. Physiological and nutritional indicators of tolerance to salinity in chickpea plants growing under symbiotic conditions. *Environmental and Experimental Botany*. 58: 17-24.

Toivonen, P.M.A. and Sweeney, M. 1998. Differences in chlorophyll loss at 13 °C for two broccoli (*Brassica oleracea* L.) cultivars associated with antioxidant enzyme activities. *Journal of agricultural and food chemistry*. 46(1): 20-24.

Vallarino, J.G., Osorio, S., Bombarely, A., Casañal, A., Cruz-Rus, E., Sánchez-Sevilla, J.F., Amaya, I., Giavalisco, P., Fernie, A.R., Botella, M.A. and Valpuesta, V. 2015. Central role of Fa GAMYB in the transition of the strawberry receptacle from development to ripening. *New Phytologist*. 208(2): 482-496.

Zaerei, B.M. and Sarikhani, H. 2016. The effect of methods of application of two form of fertilizer of Nano- and micro-iron on iron level and catalase and peroxidase active in strawberry cv. *Paros*. The First National Symposium Of Berries. University of Bu Ali Hamedan, Iran. [In Farsi].