

Effect of Iron Fertilizers and Tuber Size on the Quality of Potato Tuber (*Solanum tuberosum* L.)

M. Pourahmadi¹, R. Zargami², M. Diyanat^{1*}, A. Mohammadi Torkashvand¹

1- Department of Agricultural Science and Engineering, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Agricultural Biotechnology Research Institute, Karaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: 0383713072@iaui.ir)

Received: 30 April 2024

Revised: 26 January 2025

Accepted: 17 March 2025

Available Online: 17 March 2025

How to cite this article:

Pourahmadi, M., Zargami, R., Diyanat, M., & Mohammadi Torkashvand, A. (2025). Effect of iron fertilizers and tuber size on the quality of potato tuber (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Horticultural Science*, 39(3), 373-386. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.87850.1340>

Introduction

Iron is an essential element for plants, playing a crucial role in the structure of many oxidation and reduction enzymes and in the synthesis of chlorophyll. Its importance in nitrogen fixation and enzyme activity has been well-documented. However, in calcareous soils, such as those in Iran, non-chelated forms of iron are not effective in providing iron to plants and soil microorganisms. The use of iron chelates is considered the best solution to address iron chlorosis, particularly in alkaline soils. Excessive use of chemical fertilizers has led to the alkalization of large agricultural areas, causing challenges such as reduced absorption of micronutrients, including iron. This experiment was designed to evaluate the effects of different particle sizes of micronutrients, including iron oxide and iron chelate nanofertilizers, on tuber quality. The potatoes used in this study were cultivated from seedlings produced through tissue culture.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted using a completely randomized design with three replications at the greenhouse of the Agricultural Research Institute of Hamadan during 2018–2019 and 2019–2020. The experimental factors included: microtuber weight at three levels of 1-3, 3-5 and 5-10 g and different iron fertilizers at seven levels of Zero, 20 μ mol iron chelate in the form of soil consumption, 20 μ mol nano iron oxide in the form of soil consumption, foliar spraying of 1% iron chelate, foliar spraying of 2% iron chelate, foliar spraying of 1% nano iron oxide and foliar spraying of 2% nano iron oxide. The iron chelate fertilizer (Fe-EDDHA 7%) was sourced from Khadra Company and is water-soluble, with plant absorption at pH levels of 3–11. Nano iron oxide with a purity of 98% was obtained from Pishgaman Nano Materials, an Iranian company. Data analysis was performed using SAS statistical software. Bartlett's test was used to check data normality, and means were compared using Duncan's Multi-Range Test at a 5% probability level.

Results and discussion

The results of the comparison of the mean number of eyes in the microtuber under the influence of the size of the tuber and iron fertilizer showed that the lowest number of eyes per tuber (3.18 eyes) was in the absence of application of iron fertilizer in the tuber 1-3 g and the highest number of eyes in the tuber (4.24 eyes) was in the application of 20 μ mol iron chelate was obtained in microtuber 10-5 g. The results indicated that the number of tuber eyes, as well as iron, protein, and amino acid contents (alanine, glycine, methionine, and lysine), increased with the weight of the microtubers. Iron fertilizers had no significant effect on protein levels in microtubers weighing 1–3 g or 3–5 g. However, in 5–10 g microtubers, the highest protein contents (4.67%, 4.81%, 5.16%,



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.87850.1340>

5.4%, and 5.67%) were observed with treatments of 2% iron chelate, 1% iron chelate, 2% nano iron oxide, 20 μmol nano iron oxide, and 20 μmol iron chelate, respectively. There was no significant effect of iron fertilizers on alanine in 5–10 g microtubers. In 1–3 g microtubers, treatments with 20 μmol iron chelate, 20 μmol nano iron oxide, 1% iron chelate, and 2% nano iron oxide resulted in the greatest increases in alanine levels. In 1–3 g microtubers, iron application did not significantly differ from the control. In 3–5 g microtubers, foliar spraying with 2% iron chelate increased methionine by 17.92%. For 5–10 g microtubers, the highest methionine levels (1.32 and 1.36 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW) were observed with treatments of 20 μmol iron chelate and 2% iron chelate. The maximum lysine levels (2.19, 2.43, and 2.49 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ FW) were achieved with treatments of 20 μmol iron chelate, 1% nano iron oxide (foliar spray), and 20 μmol nano iron oxide, respectively, in 5–10 g microtubers.

Conclusion

Nano iron oxide fertilizers were more effective than iron chelates in enhancing tuber quality. The nanoscale size of iron particles increases the number of reactive atoms, resulting in higher reactivity and efficiency. Consequently, the application of nano iron fertilizers requires less material while achieving superior results. The highest quality improvement of potato tuber was observed in microtubers of 5-10 g and foliar application of nano iron oxide fertilizer.

Keywords: Amino acid, Micro nutrient, Protein

اثر کودهای آهن و اندازه ریزغده بر کیفیت غده سیب‌زمینی (*Solanum tubersum* L.)محسن پوراحمدی^۱ - رضا ضرغامی^۲ - مرجان دیانت^۱ - علی محمدی ترکاشوند^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

چکیده

به‌منظور بررسی اثر اندازه‌های مختلف ریزغده‌ها و کودهای نانواکسید آهن و کلات آهن بر کیفیت غده سیب‌زمینی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی همدان در طی سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹ اجرا گردید. عوامل آزمایشی شامل سطوح وزنی ریزغده در سه سطح ۱-۳، ۵-۳ و ۱۰-۵ گرم و کودهای مختلف آهن در هفت سطح ۱- صفر، ۲- کلات آهن به‌صورت خاک کاربرد به‌میزان ۲۰ میکرومولار، ۳- نانواکسید آهن به‌صورت خاک کاربرد به‌میزان ۲۰ میکرومولار، ۴- محلول‌پاشی یک درصد کلات آهن ۵- محلول‌پاشی دو درصد کلات آهن، ۶- محلول‌پاشی یک درصد نانواکسید آهن و ۷- محلول‌پاشی نانواکسید آهن دو درصد بود. نتایج نشان داد که با افزایش وزن ریزغده‌ها، تعداد چشم روی غده و محتوای آهن، پروتئین و اسیدهای آمینه آلانین، گلیسین، متیونین و لیزین غده افزایش یافت. در ریزغده ۱-۳ گرم، بیشترین میزان اسید آمینه لیزین به‌میزان ۱/۷۶ میکرومول در گرم وزن‌تر از کاربرد دو درصد نانواکسید آهن حاصل شد. در ریزغده ۵-۳ گرم، بیشترین پروتئین به‌میزان ۴/۸۶ درصد در تیمار ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن حاصل شد. در ریزغده ۱۰-۵ گرم، بالاترین پروتئین به‌میزان ۴/۶۷، ۴/۸۱، ۵/۱۶، ۵/۴ و ۵/۶۷ درصد به ترتیب در تیمارهای دو درصد کلات آهن، یک درصد کلات آهن، دو درصد نانواکسید آهن، ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن و ۲۰ میکرومولار کلات آهن به دست آمد. بیشترین بهبود خصوصیات کمی و کیفی غده سیب‌زمینی در ریزغده‌های ۱۰-۵ گرم مشاهده شد. بنابراین محلول‌پاشی کود نانواکسید آهن (دو درصد) جهت افزایش وزن غده و محتوای آهن، پروتئین و اسیدهای آمینه در ریزغده‌های سیب زمینی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسید آمینه، پروتئین، ریز مغذی

مقدمه

با افزایش جمعیت، اهمیت کشاورزی برای تمام جوامع بشری بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است. اولین و مهم‌ترین نیاز هر انسان، به مواد غذایی و عرضه مواد غذایی است که در ارتباط مستقیم و غیرمستقیم با کشاورزی می‌باشد. آهن یکی از عناصر ضروری برای رشد بقاء گیاهان می‌باشد، زیرا برای فرایندهای فیزیولوژیکی و عملکرد صحیح متابولیک‌های چندان ضروری است (Grillet et al., 2014). در سال‌های اخیر، شکاف بین تقاضا و تولید مواد غذایی ناشی از افزایش جمعیت و کاهش اراضی قابل کشت در کره زمین به‌دلیل شهرنشینی افزایش یافته است. بنابراین، افزایش تولید محصولات

زراعی با حداقل خسارت زیست‌محیطی امری ضروری می‌باشد (Zhao et al., 2018).

ارزش غذایی سیب‌زمینی به‌دلیل داشتن هیدروکربن‌های قابل هضم و پروتئین‌های حاوی لیزین است که در بسیاری از محصولات مانند غلات و سبزیجات وجود ندارد. این محصول به‌دلیل داشتن متابولیت‌های اولیه و ثانویه نقش مهمی در فرایندهای متابولیک انسان دارد. اهمیت غذایی سیب‌زمینی تنها به‌دلیل انرژی‌زایی آن نبوده، بلکه این محصول حاوی مقادیر قابل توجهی ویتامین‌های B₆ و C، فیبر و مواد معدنی همانند آهن، منیزیم، روی و مس است. این گیاه از نظر کارایی کاربرد آب، عملکرد ماده خشک قابل کاربرد، مقدار پروتئین و مواد معدنی در واحد سطح بر غلات برتری دارد (Birch et al., 2012).

ریزغده سیب‌زمینی دارای قطر ۵ تا ۱۵ میلی‌متر می‌باشد و پتانسیل تولید یک گیاه کامل سیب‌زمینی را دارد. ریزغده‌های سیب-

۱- گروه علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، کرج، ایران

(Email: 0383713072@iaui.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.87850.1340>

زمینی، غده‌های عاری از ویروسی هستند که در یک محیط کنترل شده تحت شرایط بهداشتی مناسب، از گیاهچه‌های آزمایشگاهی، پس از انتقال به گلخانه، در تراکم زیاد تولید می‌شوند (Asghari & Fathi, 2010). ریزغده سیب‌زمینی نقش مهمی در سیستم تولید غده بذری آن دارد (Struik, 2007).

آهن یکی از عناصر ضروری اما کم‌کاربرد و کم‌تحرک برای گیاهان است. در بین همه ریزمغذی‌ها، گیاهان بیشترین نیاز را به آهن دارند. آهن، در ساختار بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیاء وجود دارد و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز می‌باشد. نقش این عنصر در تثبیت نیتروژن و فعالیت برخی از آنزیم‌ها، به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از آهن به شکل‌های غیرکلات به‌خصوص در خاک‌های آهکی ایران، تأثیر زیادی در فراهم آوردن آهن برای گیاه و ریزجانداران خاک ندارند. ترکیب کلات آهن، بهترین راه‌حل برای برطرف کردن کلروز آهن در همه خاک‌ها و به‌ویژه خاک‌های قلیایی است (Taiz & Zeiger, 2002). آهن دارای نقش کوآنزیمی در تعدادی از آنزیم‌های گیاهی نظیر دهیدروژناز، ردوکتاز و اکسیداز بوده و در سنتز یا تجمع ریبوزوم‌ها دخالت دارد. در صورت کمبود آهن، فعالیت این آنزیم‌ها کاهش می‌یابد (Havlin, 2016). با کاربرد عناصر آهن، فعالیت فوسفات‌تحرک می‌شود که منجر به افزایش ترکیبات شیمیایی مانند پروتئین می‌گردد (Zhang et al., 2022). مشخص شده است که بین غلظت پروتئین و غلظت آهن ارتباط نزدیک و مثبت وجود دارد (Mahil & Kumar, 2019). مقادیر کافی عناصر روی و آهن، جهت افزایش متابولیسم کربوهیدرات‌ها، DNA، RNA، سنتز روغن‌ها و پروتئین‌ها ضروری است و کاربرد و رفع کمبود این عناصر سبب بهبود واکنش‌های فیزیولوژیک دخیل در سنتز پروتئین‌ها می‌شود (Wang et al., 2020).

استفاده از محلول‌پاشی کودها به‌ویژه کودهای عناصر کم‌کاربرد، یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های کاربرد کود می‌باشد که در مقایسه با کاربرد خاکی آن هفت برابر کارایی بیشتری داشته و گیاه نیز واکنش سریع‌تری به آن نشان می‌دهد. دلیل این امر، تعادل در فرمولاسیون و کلاته شدن، دقت در زمان مناسب کاربرد کود، پخش یکنواخت محلول غذایی در سطوح برگ‌ها و کارایی بالا در جذب عناصر می‌باشد (Monsef-Afshar et al., 2012). کاربرد کود آهن بر ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، وزن هزار دانه، عملکردهای دانه و کل، شاخص کلروفیل و جذب آهن و منگنز توسط دانه کلزا معنی‌دار بود (Mirzashahi et al., 2017). در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) مقدار پروتئین‌های محلول برگ، گلوکز، زایلوز پرولین و مانوز در کاربرد خاکی کلات آهن به بالاترین میزان خود رسید، اما بیشترین درصد آب نسبی برگ در محلول‌پاشی کلات آهن به دست آمد

(Fathi et al., 2015). با کاربرد آهن عملکرد غده، تعداد غده در بوته، ضخامت پوست غده و وزن خشک اندام هوایی افزایش یافت (Jam et al., 2015). اظهار شده است که آهن می‌تواند از طریق طولانی کردن دوره پر شدن غده به افزایش وزن غده کمک نماید (Feng, 2022). کاربرد نانوذرات آهن در سیب‌زمینی افزایش ارتفاع ساقه، قطر ساقه، تعداد ساقه اصلی، تعداد غده در بوته، وزن متوسط غده، عملکرد غده، درصد ماده خشک و کاهش نیترات را به همراه داشت (Khodadadi-Karooki et al., 2020). برخی پژوهشگران افزایش میزان اسیدآمینو لیزین را تحت تأثیر افزایش سطوح کود نیتروژن و عناصر ریزمغذی از جمله آهن مشاهده کردند (Aqiqi Shahvardi-Kandi et al., 2018). همچنین افزایش قابل توجه درصد اسیدآمینو لیزین سیب‌زمینی در اثر کاربرد نانوکودهای زیستی حاوی آهن مشاهده گردیده است (Hamzapour et al., 2014). با کاربرد عناصر ریزمغذی مثل آهن، کارایی گیاهان در استفاده از منابع نیتروژن افزایش یافته و منجر به افزایش ساخت اسیدآمینو‌هایی از جمله لیزین، متیونین و تریپتوفان می‌گردد (Monsef-Afshar et al., 2012).

متأسفانه کودهای شیمیایی قابلیت بالایی در آلوده‌سازی خاک، آب و هوا دارند، بنابراین در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی در جهت تأمین نهاده‌های مربوط به کشاورزی صورت گرفته است. برای کاهش مشکلات ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی، استفاده از فرم نانو برای عناصر کم کاربرد مطرح شده است (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013). با توجه به قلیایی شدن سطح وسیعی از خاک‌های زراعی به‌دلیل استفاده بیش از اندازه کودهای شیمیایی و مشکل جذب عناصر ریزمغذی شبیه آهن، هدف از این آزمایش، اثر اندازه‌های مختلف ریزغده‌ها و کودهای نانوآکسید آهن و کلات آهن بر کیفیت غده‌های سیب زمینی حاصل از گیاهچه‌های حاصل از کشت بافت بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی همدان در طی سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹ اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل سطوح وزنی ریزغده در سه سطح ۱-۳، ۵-۳ و ۱۰-۵ گرم و کودهای مختلف آهن در هفت سطح ۱-، صفر، ۲- کلات آهن به‌صورت خاک کاربرد به‌میزان ۲۰ میکرومولار، ۳- نانوآکسید آهن به‌صورت خاک کاربرد به‌میزان ۲۰ میکرومولار، ۴- محلول‌پاشی کلات آهن یک درصد ۵- محلول‌پاشی کلات آهن دو درصد، ۶- محلول‌پاشی نانوآکسید آهن یک درصد و ۷- محلول‌پاشی نانوآکسید

۱۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس در شب و ۲۶ تا ۲۸ درجه در روز تأمین گردید. رطوبت گلخانه نیز ۶۵-۶۰ درصد بود. پس از استقرار کامل بوته، محلول پاشی در دو مرحله به فاصله ۱۵ روز (اولین مرحله پس از استقرار کامل بوته BBCH= 13) انجام شد. زمان محلول پاشی اوایل صبح بود که تا حد امکان از اثرات نامطلوب نور خورشید جلوگیری به عمل آید. در این آزمایش از کود کلات آهن (Fe-EDDHA) هفت درصد) شرکت خضراء که قابل جذب برای گیاه در pH بین ۳ و ۱۱ و کاملاً محلول در آب است، استفاده گردید. همچنین نانواکسید آهن از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شد، این کود دارای خلوص ۹۸ درصد، اندازه ذرات ۴۰-۲۰ نانومتر، سطح ویژه ۶۰-۴۰ مترمربع در گرم، رنگ قرمز قهوه‌ای، فاز بلور منفرد و شکل بلور کروی بود. نانوذرات اکسید آهن پس از کاشت و زمانی که بوته‌ها استقرار پیدا کردند با استفاده از سم پاش دستی در دو مرحله به فاصله ۱۵ روز به مقدار لازم برای هر جعبه کشت توزین و پای بوته‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقدار ۰/۱۶ گرم از این ماده با آب مقطر دو بار تقطیر در بالن ژوژه به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. مخلوط حاصل ۳۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک با توان ۱۰۰ وات و فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به منظور پراکنده شدن ذرات قرار گرفتند. سپس یک مگنت مغناطیسی درون محلول قرار داده شد و به مدت ۶۰ دقیقه روی دستگاه همزن قرار گرفت تا مانع چسبیدن نانوذرات شود. از این محلول برای ساخت مقدار استفاده شد. برای ساخت دو میکرومولار یک میلی‌لیتر از سوسپانسیون را در یک لیتر آب حل و به خاک اضافه شد (Prasad et al., 2012). در طی مراحل رشد، دو مرحله خاک‌دهی پای بوته‌ها صورت پذیرفت، مرحله اول زمانی که ارتفاع بوته‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود و مرحله دوم در زمان گل‌دهی بوته‌ها انجام شد. در طول دوره رشد به منظور مهار آفات و بیماری‌ها، قبل از مرحله گل‌دهی مخلوط دیازینون (به نسبت ۱/۵ در هزار) و متاسیتوکس (به نسبت یک در هزار) برای مهار شته و آگروتیس به کار برده شد.

صفات مورد بررسی

در پایان آزمایش، بوته‌ها پس از رسیدگی محصول برداشت شدند. وزن غده در هر بوته (متوسط چهار غده) و تعداد چشم‌های هر غده اندازه‌گیری و یادداشت گردید.

پروتئین به روش برادفورد (Bradford, 1976) محاسبه شد. بدین شکل که در ابتدا داخل لوله آزمایش پنج میلی‌لیتر معرف بیوره ریخته و سپس به آن ۱۰۰ میکرولیتر عصار آنزیمی اضافه کرده و بلافاصله لوله‌های آزمایش، ورتکس شده و در ادامه میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به دست آمد. برای اندازه‌گیری غلظت آهن، نمونه‌های پودر شده به روش

آهن دو درصد (Ardashiri & Jahanbin, 2018) بود. در این تحقیق از ریزغده‌های حاصل از کشت بافت رقم 'سانته' موجود در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج استفاده شد.

نحوه اجرای آزمایش

ریزغده‌ها حدود ۲۰ روز قبل از کاشت از سردخانه (چهار درجه سلسیوس) خارج و ابتدا در جعبه در تاریکی در دمای ۱۵-۲۰ درجه سلسیوس قرار گرفته تا جوانه‌ها فعال شوند، به طوری که در زمان کاشت، ریزغده‌ها از نظر سن فیزیولوژیک در شرایط سنی جوانه‌زنی معمولی ۱/۵-۱ سانتی‌متری و دارای ۳-۵ جوانه سبز بودند. پس از ضدعفونی گلخانه، جعبه‌های کشت نیز شسته و با سدیم هیپوکلریت ضدعفونی گردید. سپس وزن خالی آن‌ها اندازه‌گیری شد. محیط کشت که ترکیبی از پیت ماس و پرلیت و با نسبت ۳:۱ (پرلیت: پیت‌ماس) مخلوط شده ضدعفونی گردید. سپس داخل جعبه‌های کشت با عمق ۲۰ سانتی‌متر در ابعاد ۳۰ در ۵۰ سانتی‌متر به مقدار مساوی (۲۰ کیلوگرم) از محیط کشت ریخته شد. درون هر کدام از جعبه‌ها پنج ریزغده رقم سانته کشت گردید. گلدان‌ها به مدت چهار ماه در شرایط گلخانه‌ای در دمای مناسب (۲۰/۱۵ درجه سلسیوس شب/روز) نگهداری شدند. آبیاری محیط کشت تا حد اشباع انجام شد. برای تعیین رطوبت ظرفیت زراعی، پس از گذشت حدود ۲۴ ساعت از زمان آبیاری، تمام جعبه‌های کشت وزن شدند. وزن خالی جعبه‌ها و وزن محیط کشت داخل آن‌ها از مقدار وزن به دست آمده کم شد، در این صورت وزن به دست آمده بیانگر مقدار آب موجود در بستر کشت و در جعبه‌های کشت در وضعیت ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی می‌باشد. جعبه‌های کاشت به صورت مرتب پس از هر ۲۴ ساعت وزن شده و مطابق با کاهش وزن (۱۰ درصد) و رسیدن به میزان مورد نظر از ظرفیت مزرعه‌ای (۹۰ درصد) براساس میزان آب مورد نیاز مجدداً آبیاری شدند (Parvizi & Navaei, 2019). شرایط محیط گلخانه از نظر نور و دما به صورت خودکار تنظیم شد. در دو ماه اول کاشت و قبل از غده‌زایی، طول روز با ۱۶ ساعت تنظیم شد و دوره نوری بیشتر با روشن نمودن لامپ‌های سدیمی فشار بالا به صورت خودکار به وسیله زمان‌سنج مرکزی تأمین شد. در دو ماه آخر دوره رشد، طول روز معمولی ۱۲ ساعته و کمتر برقرار شد. در ارتباط با شدت نور با توجه به پوشش گلخانه، شدت نوری معادل ۲۰ تا ۲۲ هزار لوکس قابل دریافت بود، اما در روزهای ابری و بارانی با روشن کردن لامپ‌های سدیمی فشار بالا (با توزیع دو عدد لامپ ۲۵۰ وات) در هر ۱۰ مترمربع از سطح گلخانه) و تأمین شدت نوری معادل ۵۰۰۰ لوکس به‌ازاء هر لامپ، کمبود نور در گلخانه جبران شد. دمای داخلی گلخانه با تنظیم سیستم تهویه مطبوع و حرارت مرکزی در محدوده

استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

وزن غده در بوته

نتایج تجزیه مرکب نشان داد که اندازه ریزغده، آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده با آهن در سطح احتمال یک درصد بر وزن غده در بوته تأثیر معنی‌دار داشتند (جدول ۱). بیشترین وزن غده در بوته در ریزغده ۱-۳ گرم ($40.5/23$ گرم) مربوط به کاربرد ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن، در ریزغده ۵-۳ گرم ($44.4/61$ گرم) مربوط به محلول‌پاشی دو درصد کلات آهن و در ریزغده ۱۰-۵ گرم ($55.6/92$ ، $54.4/52$ ، $48.2/60$ و $46.5/82$ گرم) مربوط به تیمارهای ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن، محلول‌پاشی دو درصد نانواکسید آهن، محلول‌پاشی یک درصد نانواکسید آهن و محلول‌پاشی دو درصد کلات آهن بود (جدول ۲). استفاده از کود آهن باعث جذب بهتر سایر عناصر غذایی پرکاربرد در مرحله زایشی می‌گردد که از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین‌کننده مخزن می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش کاربرد این عنصر موجب رفع محدودیت‌های عناصر غذایی برای گیاه شده و بازده فتوسنتزی و تولید گیاه را افزایش می‌دهد و موجب افزایش تعداد غده می‌شود (Gomaa et al., 2020). آهن می‌تواند از طریق طولانی کردن دوره پر شدن غده به افزایش وزن غده کمک نماید (Timsina, 2013). وزن غده همبستگی معنی‌داری با تعداد چشم روی غده ($r=0.491^{**}$)، محتوای آهن ($r=0.642^{**}$)، پروتئین ($r=0.732^{**}$)، آلانین ($r=0.69^{**}$)، گلايسين ($r=0.457^{**}$)، متیونین ($r=0.421^{**}$) و لیزین ($r=0.729^{**}$) داشت (جدول ۳). در مطالعات پژوهشگران بسیاری نیز افزایش عملکرد و برخی از اجزاء عملکرد با استفاده از نانوکودهای ماکرو و میکرو گزارش شده است (Bakhtiari et al., 2015).

تعداد چشم در غده

همان‌طور که از نتایج تجزیه مرکب مشهود است، اثر اندازه ریزغده و کودهای آهن در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل اندازه ریزغده با آهن در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد چشم در غده معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین تعداد چشم در غده تحت تأثیر اندازه ریزغده و کود آهن نشان داد که کمترین تعداد چشم در غده به میزان ۳/۱۸ چشم در عدم کاربرد کود آهن در ریزغده ۱-۳ گرم و بیشترین تعداد چشم در غده به میزان ۴/۲۴ چشم در کاربرد ۲۰ میکرومولار کلات آهن در ریزغده ۱۰-۵ گرم حاصل گردید (جدول ۲).

خشک‌سوزانی هضم و غلظت عناصر در عصاره هضم‌شده با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای اندازه‌گیری شد (Paech & Tracey, 2013). برای اندازه‌گیری میزان تجمع آهن در غده، نمونه‌های مورد نظر با آب مقطر شسته شدند و سپس در آون خشک شده و آسیاب شدند. از پودر حاصل میزان ۰/۵ گرم توزین و به وسیله کوره الکترونیکی با دمای ۵۵۰ سلسیوس به مدت شش ساعت خاکستر گردید. نمونه‌های خاکستر در پنج میلی‌لیتر اسید کلریدریک (دو نرمال) حل شده و به مدت ۴۵ دقیقه روی هات‌پلیت در دمای ۷۵ سلسیوس قرار گرفت و در نهایت با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده و عصاره‌گیری با عبور دادن محلول از کاغذ صافی انجام شد (Jeong & Guerinot, 2009).

برای سنجش اسیدهای آمینه، مقدار ۰/۳ گرم بافت تر درون ویال ۱/۵ میلی‌متری ریخته و بر روی آن یک میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد ریخته شد و ویال‌های حاوی نمونه به بن‌ماری شیکردار (ترمومیکسر) با دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت یک دقیقه منتقل شدند. بعد از آن، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای چهار درجه سلسیوس (13.000 دور در دقیقه) سانتی‌فیوژ گردید. سپس محلول رویی برداشته شده و به ویال‌های دو میلی‌متری جدید انتقال یافت. نمونه درون دستگاه تغلیظ‌کننده در دمای ۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا محلول الکلی آن‌ها جدا شود درون ویال خارج‌شده از دستگاه تغلیظ‌کننده، یک میلی‌لیتر آب مقطر دیونیزه ریخته و ورتکس شد. این محلول به کمک فیلتر ۰/۴۵ میکرومتری صاف گردید. درون ویال دو میلی‌متری جدید، ۲۵۰ میکرولیتر از این محلول صاف‌شده ریخته و سپس ۲۰۰ میکرولیتر بافر بورات و در نهایت ۱۰۰ میکرولیتر O-Phthaldialdehyde اضافه گردید. دقیقاً بعد از ۱۲۰ ثانیه، مقدار ۵۰ میکرولیتر HCl ۰/۵ مولار به ویال افزوده، در ویال را بسته، چندبار دستی آن را تکان داده و در نهایت با سرنگ مخصوص، به دستگاه HPLC (مدل Agilent 1260) با ستون C18، HALO پنج سانتی‌متری (دمای ستون ۲۵ درجه سلسیوس) و فازهای متحرک (حلال‌ها) با شدت جریان ۱/۱ میلی‌لیتر در دقیقه، تزریق شد. با تزریق غلظت‌های هر یک از اسیدهای آمینه و محاسبه مساحت سطح زیر منحنی هر یک از غلظت‌های داده‌شده به دستگاه و تعیین رابطه غلظت و سطح زیر منحنی، منحنی استاندارد رسم شده و مقادیر هر یک از اسیدهای آمینه محاسبه شد (Manivannan et al., 2008).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. جهت بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون بارتلت

جدول ۱ - نتایج تجزیه مرکب اثر اندازه ریزغده‌ها و کودهای آهن بر صفات مختلف کمی و کیفی غده سیب‌زمینی رقم 'سانته'

منابع تغییرات	درجه آزادی	df	وزن غده در بوته	تعداد چشم در غده	آهن	پروتئین	آلانین	گلیسین	متیونین	لیزین	والین	ایزولوسین
S.O.V			Tuber weight per plant	Number of eyes on tuber	Iron	Protein	Alanine	Glycine	Methionine	Lysine	Valine	Isoleucine
سال		1	25.17 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	0.00006 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.003 ^{ns}
Year												
تکرار در سال		4	1322.6	0.19	0.01	0.23	0.09	0.03	0.01	0.01	0.02	0.07
(Year) Replication												
اندازه ریزغده (a)		2	183473.99 ^{**}	0.45 [*]	0.88 ^{**}	8.81 ^{**}	0.92 ^{**}	0.58 ^{**}	0.04 ^{**}	5.55 ^{**}	0.09 ^{ns}	0.07 ^{ns}
Mimi tuber size (a)												
کود آهن (b)		6	44755.49 ^{**}	0.39 [*]	0.81 ^{**}	2.21 ^{**}	1.14 ^{**}	0.25 ^{**}	0.09 ^{**}	0.66 ^{**}	0.44 ^{**}	0.14 ^{ns}
Iron fertilizer (b)												
b×a		12	4751.35 ^{**}	0.38 ^{**}	0.22 ^{**}	0.76 ^{**}	0.17 ^{**}	0.14 ^{**}	0.03 ^{**}	0.22 ^{**}	0.23 [*]	0.08 ^{ns}
a× year		2	48.57 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.06 ^{ns}
b× year		6	777.48 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.03 ^{ns}
b×a× year		12	698.38 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.04 ^{ns}
خطا		80	1850.94	0.13	0.01	0.19	0.07	0.03	0.01	0.01	0.1	0.12
Error												
ضریب تغییرات		-	10.77	10.23	9.77	10.05	10.02	6.89	6.76	6.78	7.32	11.15
CV (%)												
آزمون بارلت		-	0.78	0.88	0.77	0.91	0.83	0.81	0.81	0.81	0.59	0.94
Bartlett (P)												

ns و **: به ترتیب عدم معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

ns, * and **: not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

محل‌یابی یک درصد کلات آهن	351.82 ^{d-h}	3.44 ^{ab}	1.21 ^{b-f}	4.54 ^{a-e}	2.3 ^{bcd}	2.68 ^{a-d}	1.14 ^{bcd}	1.55 ^{d-g}	4.18 ^{ab}
Foliar application of 1% Iron chelate									
محل‌یابی دو درصد کلات آهن	444.61 ^{a-e}	3.18 ^{ab}	0.89 ^{ab}	3.93 ^{de}	2.46 ^{a-d}	2.46 ^{a-e}	1.25 ^{abc}	2.08 ^{bc}	4.37 ^{ab}
Foliar application of 2% Iron chelate									
محل‌یابی یک درصد نانو اکسید آهن	364.24 ^{c-h}	3.73 ^{ab}	1.01 ^{d-h}	4.36 ^{b-e}	2.41 ^{a-d}	2.67 ^{a-d}	1.15 ^{a-d}	1.68 ^{def}	4.34 ^{ab}
Foliar application of 1% Iron nano oxide									
محل‌یابی دو درصد نانو اکسید آهن	405.68 ^{c-g}	3.26 ^{ab}	1.3 ^{a-d}	4.41 ^{b-e}	2.8 ^{abc}	2.55 ^{a-e}	1.16 ^{a-d}	2.02 ^{bc}	4.42 ^{ab}
Foliar application of 2% Iron nano oxide									
عدم کاربرد (شاهد) Control	348.88 ^{d-h}	3.53 ^{ab}	0.93 ^{gh}	4.31 ^{b-e}	2.52 ^{a-d}	2.43 ^{a-e}	1.03 ^{cd}	1.77 ^{cde}	4.04 ^{ab}
۲۰ میکرومولار کلات آهن خاک کاربرد	419.84 ^{c-g}	4.24 ^a	1.53 ^a	5.67 ^a	3.11 ^a	2.63 ^{a-d}	1.32 ^{ab}	2.19 ^{ab}	4.17 ^{ab}
Soil application of 20 μmol Iron chelate									
۲۰ میکرومولار نانو اکسید آهن خاک کاربرد	556.92 ^a	3.84 ^{ab}	1.19 ^{b-f}	5.4 ^{ab}	2.94 ^{ab}	2.87 ^{ab}	1.16 ^{a-d}	2.49 ^a	4.15 ^{ab}
Soil application of 20 μmol Iron nano oxide									
محل‌یابی یک درصد کلات آهن	465.82 ^{a-d}	3.55 ^{ab}	1.26 ^{a-e}	4.81 ^{a-d}	2.59 ^{a-d}	2.49 ^{a-e}	1.09 ^{cd}	1.88 ^{bcd}	4.58 ^a
Foliar application of 1% Iron chelate									
محل‌یابی دو درصد کلات آهن	478.96 ^{abc}	3.71 ^{ab}	1.47 ^{ab}	4.67 ^{a-e}	2.89 ^{abc}	2.88 ^a	1.36 ^a	2.02 ^{bc}	4.15 ^{ab}
Foliar application of 2% Iron chelate									
محل‌یابی یک درصد نانو اکسید آهن	482.6 ^{abc}	3.21 ^{ab}	0.98 ^{c-h}	3.9 ^{de}	2.27 ^{bcd}	2.48 ^{a-e}	1.08 ^{cd}	2.43 ^a	4.56 ^a
Foliar application of 1% Iron nano oxide									
محل‌یابی دو درصد نانو اکسید آهن	544.52 ^{ab}	3.77 ^{ab}	1.48 ^{ab}	5.16 ^{abc}	3.08 ^a	2.37 ^{cde}	1.22 ^{abc}	2.13 ^b	4.32 ^{ab}
Foliar application of 2% Iron nano oxide									

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
Means with the same letters in each column are not significantly different at 5% level based on Duncan's Multiple Range Test.

آهن غده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اندازه ریزغده، کودهای آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر آهن غده معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین آهن غده در ریزغده ۳-۱ گرم در محلول‌پاشی دو درصد کلات آهن و دو درصد نانواکسید آهن به‌میزان ۱/۳۳ درصد، در ریزغده ۵-۳ گرم در کاربرد ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن و محلول‌پاشی دو درصد نانواکسید آهن به‌میزان ۱/۴۷ و ۱/۳ درصد و در ریزغده ۱۰-۵ گرم در کاربرد ۲۰ میکرومولار کلات آهن به‌میزان ۱/۵۳ درصد، محلول‌پاشی یک و دو درصد کلات آهن به‌میزان ۱/۲۶ و ۱/۴۷ درصد و محلول‌پاشی دو درصد نانواکسید آهن به‌میزان ۱/۴۸ درصد به دست آمد (جدول ۲). نتایج این آزمایش با نتایج سایر محققان در افزایش

جذب عناصر غذایی مانند آهن در اثر کاربرد کودهای آهن هم‌خوانی داشت (De Souza et al., 2019; Jalali et al., 2017). افزایش جذب آهن با افزایش سطوح کاربرد کود آهن گزارش شده است (Lafmejani et al., 2018). در تأیید این نتایج گزارش شده است که استفاده از پودر نانواکسید آهن نسبت به آهن اکسید معمولی، در افزایش غلظت آهن در گیاه به‌طور معنی‌داری اثر برتری داشته است که احتمالاً به‌دلیل ویژگی‌های نانوذرات بوده است (Mazaherinia et al., 2010; Ahmed et al., 2000). ذرات کودی می‌تواند با غشاهایی در مقیاس نانو پوشیده شوند که رهاسازی آهسته و مداوم عناصر غذایی را تسهیل می‌کند. پوشاندن و سیمانی کردن با ذرات نانو باعث ایجاد قابلیت تنظیم رهاسازی عناصر غذایی از کپسول کودی می‌شود (Liu et al., 2006).

جدول ۳- همبستگی ساده بین صفات مورد بررسی سیب‌زمینی رقم 'سانته'

Table 3- Simple correlation among traits of potato cv. Santeh

وزن غده در بوته Tuber weight per plant	تعداد چشم روی غده Number of eyes on tuber	آهن Iron	پروتئین Protein	آلانین Alanine	گلیسین Glycine	متیونین Metyonine	لیزین Lysine	والین Valine	ایزولوسین Isoleucine
1	0.491**	1	0.866**	0.796**	0.844**	0.356**	0.31**	0.468**	0.059
0.491**	1	0.20 ns	0.01 ns	0.31 ns	0.04 ns	0.10 ns	0.18 ns	0.22 ns	0.09 ns
0.642**	0.20 ns	1	0.866**	0.796**	0.844**	0.356**	0.31**	0.468**	0.059
0.732**	0.01 ns	0.866**	1	0.796**	0.844**	0.356**	0.31**	0.468**	0.059
0.69**	0.31 ns	0.854**	0.796**	1	0.844**	0.356**	0.31**	0.468**	0.059
0.457**	0.04 ns	0.744**	0.73**	0.844**	1	0.356**	0.31**	0.468**	0.059
0.421**	0.10 ns	0.572**	0.511**	0.517**	0.356**	1	0.31**	0.468**	0.059
0.729**	0.18 ns	0.459**	0.465**	0.423**	0.468**	0.31**	1	0.468**	0.059
0.238	0.22 ns	0.472**	0.469**	0.506**	0.349**	0.017	0.398**	1	0.062
0.088	0.09 ns	0.147	0.113	0.056	-0.009	0.059	0.048	0.062	1

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

* and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

پروتئین غده

نتایج تجزیه مرکب نشان داد که تأثیر اندازه ریزغده، کود آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده و آهن در سطح احتمال یک درصد بر پروتئین غده معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین بیانگر آن

بود که در ریزغده ۳-۱ و ۵-۳ گرم کاربرد کودهای آهن تأثیر معنی‌داری بر پروتئین نداشت. در ریزغده ۱۰-۵ گرم، بیشترین میزان پروتئین (به ترتیب ۴/۶۷، ۴/۸۱، ۵/۱۶، ۵/۴ و ۵/۶۷ درصد) از تیمارهای دو درصد کلات آهن، یک درصد کلات آهن، دو درصد

درصد کلات آهن و دو درصد نانواکسید آهن توانست بیشترین تأثیر را بر افزایش آلانین نشان دهد. در ریزغده ۵-۳ گرم نیز تیمارهای کاربرد آهن با افزایش آلانین همراه بود (جدول ۲). کاربرد کودهای آهن، افزایش اسیدهای آمینه را در پی داشت. با تأمین عناصر ریزمغذی و به دنبال آن افزایش کارایی استفاده از عناصر پرکاربرد، افزایش در میزان اسید آمینه اتفاق می افتد (Monsef-Afshar et al., 2012).

گلايسين

همان طور که از نتایج تجزیه مرکب (جدول ۱) مشهود است، تأثیر اندازه‌های مختلف ریزغده، کودهای آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده و آهن در سطح احتمال یک درصد بر گلايسين معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین گلايسين تحت تأثیر اندازه ریزغده و آهن نشان داد که بیشترین گلايسين به میزان ۲/۸۸ میکرومول در گرم وزن تر مربوط به محلول پاشی دو درصد کلات آهن در ریزغده ۱۰-۵ گرم بود که در این اندازه ریزغده تنها نسبت به تیمار محلول پاشی دو درصد نانواکسید آهن تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۲). همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0.844^{**}$) بین محتوای اسید آمینه گلايسين و آلانین وجود داشت (جدول ۳). در اغلب موارد، استفاده از کودهای آهن در خاک نتیجه دلخواه در پی ندارد. هنگامی که کودی در خاک استفاده می‌شود، به دلایلی نظیر آب‌شویی، پیوند با سایر عناصر در خاک و نقش ریزجاندانان، ممکن است که قسمت یا تمامی آن از دسترس گیاه خارج گردد، لذا محلول پاشی برخی از کودها می‌تواند باعث عبور آنها از موانع فیزیکی و شیمیایی مختلف گردد (Liu et al., 2008).

متيونين

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر اندازه ریزغده، آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده با آهن در سطح احتمال یک درصد بر متيونين معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین متيونين تحت تأثیر کاربرد آهن در اندازه‌های مختلف ریزغده نشان داد که کاربرد کودهای آهن در ریزغده‌های ۳-۱ گرم تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت، در ریزغده ۵-۳ گرم محلول پاشی دو درصد کلات آهن توانست موجب افزایش ۱۷/۹۲ درصدی متيونين گردد، در ریزغده ۱۰-۵ گرم بالاترین متيونين از ۲۰ میکرومولار کلات آهن و دو درصد کلات آهن به میزان ۱/۳۲ و ۱/۳۶ میکرومول در گرم وزن تر به دست آمد (جدول ۲).

نانواکسید آهن، ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن و ۲۰ میکرومولار کلات آهن به دست آمد (جدول ۲). گزارش شده است که کود نانو آهن سبب افزایش فتوسنتز و میزان پروتئین در سیبزمینی شده است (Pirzad et al., 2012). محققان نتایج مشابهی روی سویا گزارش نمودند، به طوری که کاربرد کود نانو آهن به صورت محلول پاشی در مقایسه با کود سولفات آهن، علاوه بر بهبود وزن اندام‌های هوایی و وزن خشک غلاف‌ها سبب افزایش عملکرد دانه سویا (Glycine max) نیز گردید (Sheykhbaglou et al., 2010). عنصر آهن در متابولیسم نیتروژن دخالت دارد. نیتروژن یکی از عناصر ضروری در ساخت پروتئین است. آهن به طور غیرمستقیم سبب افزایش جذب نیتروژن می‌شود (Rawashdeh & Florin, 2015). از آنجایی که نیتروژن یکی از عناصر مهم و ضروری شرکت‌کننده در ساختار پروتئین‌ها می‌باشد و کاربرد کودهای آهن از طریق حفظ کلروفیل برگ موجب افزایش طول دوره فتوسنتزی می‌شود، این امر منجر به آسیمیله شدن بهتر نیتروژن و افزایش کمی و کیفی پروتئین می‌گردد. گیاهان دارای مقادیر بالاتر عناصر ریزمغذی، کارایی بالاتری در استفاده از نیتروژن خاک دارند، بنابراین سنتز پروتئین در آن‌ها افزایش می‌یابد (Monsef-Afshar et al., 2012). عنصر آهن در ساخت پروتئین‌ها نقش مستقیمی دارد، به گونه‌ای که تعداد ریبوزوم‌های سلول‌های برگ با کمبود این عنصر به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این عنصر آهن در فرآیندهای وابسته به نور در فتوسنتز نیز دخیل می‌باشد (Gao et al., 2022). محتوای پروتئین همبستگی معنی‌داری با اسیدهای آمینه آلانین ($r=0.796^{**}$)، گلايسين ($r=0.73^{**}$)، متيونين ($r=0.511^{**}$)، لیزین ($r=0.465^{**}$) و والین ($r=0.469^{**}$) داشت (جدول ۳). نانوکودها، کارایی مصرف عناصر غذایی را از طریق سازوکارهایی مثل انتقال هدفدار، رهاسازی کنترل شده و آهسته بهبود می‌بخشند. این کودها همچنین می‌توانند دقیقاً اجزاء فعال خود را در پاسخ به محرک‌های محیطی و نیازهای بیولوژیکی آزاد کنند (Solanki et al., 2015). نانوکودها در انتقال انرژی در گیاه، فعالیت‌های آنزیمی و فتوسنتز و در نهایت در تنفس و سنتز پروتئین‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند که به بهبود رشد گیاه منجر می‌شود (Ali, 2012).

آلانين

نتایج تجزیه مرکب نشان داد که اثر اندازه ریزغده و کود آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده و کود آهن در سطح احتمال یک درصد بر آلانين معنی‌دار بود (جدول ۱). کاربرد کودهای آهن تأثیر معنی‌داری بر آلانين در ریزغده ۳-۱ گرم نداشت، در ریزغده ۱۰-۵ گرم کاربرد ۲۰ میکرومولار کلات آهن، ۲۰ میکرومولار نانواکسید آهن، یک

لیزین

اثر اندازه ریزغده، کودهای آهن و اثر متقابل اندازه ریزغده و آهن در سطح احتمال یک درصد بر لیزین معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین لیزین نشان داد که در ریزغده ۳-۱ گرم بیشترین لیزین به میزان ۱/۷۶ میکرومول در گرم وزن تر از کاربرد دو درصد نانوآکسید آهن، در ریزغده ۵-۳ گرم بالاترین لیزین به میزان ۲/۰۲ و ۲/۰۸ میکرومول در گرم وزن تر از محلول‌پاشی دو درصد نانوآکسید آهن و دو درصد کلات آهن به دست آمد. در ریزغده ۱۰-۵ گرم حداکثر لیزین به میزان ۲/۱۹، ۲/۴۳ و ۲/۴۹ میکرومول در گرم وزن تر از تیمارهای ۲۰ میکرومولار کلات آهن، محلول‌پاشی یک درصد نانوآکسید آهن و ۲۰ میکرومولار نانوآکسید آهن حاصل شد (جدول ۲). برقی و همکاران (Barghi et al., 2017) گزارش کردند که عملکرد غده سیب‌زمینی در اثر کاربرد دو گرم در لیتر نانوآکسید آهن نسبت به تیمار بدون کود به میزان هشت درصد و با محلول‌پاشی در مرحله پر شدن غده نسبت به مرحله رشد رویشی به میزان پنج درصد افزایش یافت. همچنین محلول‌پاشی بوته‌های سیب‌زمینی با آهن می‌تواند میزان آهن غده سیب‌زمینی را تا ۷۵ میکروگرم بر کیلوگرم غده افزایش داده و اثرهای سوء ناشی از کمبود آهن در خاک را برطرف سازد. محلول‌پاشی بوته‌های سیب‌زمینی با آهن، درصد اسیدهای آمینه لیزین و متیونین، پروتئین غده و عناصر معدنی مهم نظیر پتاسیم و کلسیم را افزایش می‌دهد (Barghi et al., 2017). کودهای نانو به آسانی توسط گیاه جذب شده و مؤثرتر از کودهای شیمیایی رایج هستند. به‌علاوه این کودها جزء مواد دوست‌دار طبیعت بوده و به‌دلیل عدم آلوده کردن محیط زیست و عدم افزایش شوری خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ranjbar & Shams, 2009).

والین

نتایج تجزیه مرکب مشخص کرد که آهن در سطح احتمال یک درصد و اثر اندازه ریزغده با آهن در سطح احتمال پنج درصد بر والین تأثیر معنی‌دار داشتند (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین والین تحت

تأثیر اندازه ریزغده و کود آهن نشان داد که در اندازه‌های مختلف ریزغده بین تیمارهای کود آهن و شاهد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، با این حال، بیشترین والین به میزان ۴/۵۸ و ۴/۵۶ میکرومول در گرم وزن تر از محلول‌پاشی یک درصد نانوآکسید آهن و یک درصد کلات آهن در ریزغده ۱۰-۵ گرم به دست آمد (جدول ۲). این اسیدآمینه بالاترین میزان همبستگی ($r=0.506^{**}$) را با اسیدآمینه آلانین داشت (جدول ۳). با کاهش اندازه ذرات آهن به مقیاس نانو، تعداد اتم‌هایی که می‌توانند در واکنش درگیر شوند افزایش و در نتیجه سرعت واکنش‌پذیری افزایش می‌یابد که این امر موجب می‌گردد نانوذرات آهن قدرت انتخاب‌پذیری بیشتری نسبت به کلات آهن داشته باشند. زمانی که ذرات به اندازه نانو کوچک می‌شوند، یک‌سری از خواص آن‌ها از جمله سطح ویژه و انرژی سطحی افزایش می‌یابد، این امر موجب می‌شود که میزان کاربرد ذرات آهن کمتر و واکنش در شرایط بهتری انجام گردد (Mazaherinia et al., 2010).

ایزولوسین

نتایج تجزیه مرکب مشخص کرد که اثرات سال، اندازه‌های مختلف ریزغده، کودهای آهن و اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر میزان ایزولوسین نداشتند (جدول ۱).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در ریزغده ۱۰-۵ گرم بیشترین میزان پروتئین از تیمارهای دو درصد کلات آهن، یک درصد کلات آهن، دو درصد نانوآکسید آهن، ۲۰ میکرومولار نانوآکسید آهن و ۲۰ میکرومولار کلات آهن به دست آمد. با افزایش وزن ریزغده‌ها، تعداد چشم در غده، محتوای آهن، پروتئین و اسیدهای آمینه آلانین، گلايسين، متیونین و لیزین افزایش یافت. بیشترین بهبود خصوصیات کیفی غده سیب‌زمینی در ریزغده‌های ۱۰-۵ گرم مشاهده شد و محلول‌پاشی کود نانوآکسید آهن در مقایسه با کلات آهن در بهبود کیفیت غده سیب‌زمینی مؤثرتر بود.

References

- Ahmed, H.U., Ali, M.S. & Dey, T.K. (2000). *Tuber crop disease management*. Poster presented in the International Conference on Integrated Plant Disease Management for Sustainable Agriculture. D. K. Mitra (ed), Indian Phytopathological Society, New Delhi, India. 3, 1281 p.
- Ali, E.A. (2012). Effect of iron nutrient care sprayed on foliage at different physiological growth stages on yield and quality of some durum wheat (*Triticum durum* L.) varieties in sandy soil. *Asian Journal of Crop Science*, 4(4), 139-149. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2012.139.149>
- Aqiqi Shahvardi-Kandi, M., Tobe, A., Qalipouri, A., Hasanpanah, D., & Cefalian, A. (2018). Checking the amount of protein potato cultivars with an emphasis on the amino acid allicin under the influence of different levels of fertilizers. MSc. Thesis, Faculty Agricultural Sciences and Natural Resources, Mohagheg Ardabili University, Ardabil, Iran. (In Persian)

4. Ardashiri, T., & Jahanbin. Sh. (2018). Effect of foliar application of nano-iron and zinc chelated on yield, yield components and harvest index of canola under drought stress conditions. *Crop Improvments*, 20, 31-43. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2018.220873.1582>
5. Asghari, R., & Fathi, M. (2010). *Prebasic potato seed production*. Principles and Procedures. 103 pp. (In Persian).
6. Bakhtiari, M., Moaveni, P., & Saani, B. (2015). Effect of iron nanoparticles spray on some morpho-physiological traits of wheat in Ghods region. *Journal of Crop Ecophysiology*, 7(2), 104-119. (In Persian)
7. Birch, P.R., Bryan, G., Fenton, B., Gilroy, E. M., Hein, I., Jones, J.T.A., Prashar, M. A., Taylor, L., Torrance I., & Toth, K. (2012). Crops that feed the world 8, potato, are the trends of increased global production sustainable? *Food Security*, 4(4), 477-508. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0220-1>
8. Barghi, A., Gholopouri, A., Tobe, A., Jahanbakhsh, S., & Jamaati-Samarin, Sh. (2017). Effect of iron nano oxide concentration and application time on tuber yield and quality of potato. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9, 145-155.
9. Bradford, M.M. (1976). A rapid sensitive metod for the question of microprogram quantities of protein utilizing the principle of protein – dye binding. *Annual of Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
10. De Souza, A., Govea-Alcaide, E., Masunaga, S.H., Fajardo-Rosabal, L., Effenberger, F., Rossi, L.M., & Jardim, R.F. (2019). Impact of Fe₃O₄ nanoparticle on nutrient accumulation in common bean plants grown in soil. *SN Applied Science*, 1, 308-316. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0321-y>
11. Fathi, A., Amini-Dehghi, M., & Heshmati, S. (2015). Effect of iron application methods on grain yield, yield components, oil content and fatty acids profile of spring safflower cv. Goldasht under deficit irrigation conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 16, 308-321. (In Persian), <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.15625540.1393.16.4.4.5>
12. Feng, Y., Kreslavski, V.D., Shmarev, A.N., Ivanov, A.A., Zharmukhamedov, S.K., Kosobryukhov, A., & Shabala, S. (2022). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) plants. *Plants*, 11(14), 1894-1909. <https://doi.org/10.3390/plants11141894>
13. Gao, D., Ran, C., Zhang, Y., Wang, X., Lu, S., Geng, Y., Guo, L., & Shao, X. (2022). Effect of different concentrations of foliar iron fertilizer on chlorophyll fluorescence characteristics of iron-deficient rice seedlings under saline sodic conditions. *Plant Physiology Biochemistry*, 185, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.021>
14. Gomaa, M.A., Kandil, E.E., & Ibrahim, A.M.M. (2020). Response of maize to organic fertilization and some nano-micronutrients. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences*, 11(1), 13-21. <https://doi.org/10.21608/eajbsh.2020.81409>
15. Grillet, L., Mari, S., & Schmidt, W. (2014). Iron in seeds loading pathways and subcellular localization. *Frontiers in Plant Science*, 4, 535-547. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00535>
16. Hamzapour, G.R., Tobeh, A., Jamalpour, S., & Al-Ebrahim, M.T. (2014). *Investigating the increase in nutritional quality of apple tuber ground (amino acid lysine) with the use of bio-fertilizer (biozer) in comparison with the use of nitrogen and phosphorus chemical fertilizers*. The first National Specialized Conference of Agricultural and Environmental Sciences of Iran, Ardabil, Zemin Kav Research Center, Iran. January. 5 pp. (In Persian).
17. Havlin, J. (2016). *Soil Fertility and Fertilizers, An Introduction to Nutrient Management*. 8th Edition. Pearson India. 536 p.
18. Jalali, M., Ghanati, F., Modarres-Sanavi, A.M., & Khoshgoftarmanesh, A.H. (2017). Physiological effects of repeated foliar application of magnetite nanoparticles on maize plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203, 593-602. <https://doi.org/10.1111/jac.12208>
19. Jam, A., Ebadi, A., & Parmoon, Gh. (2015). The role of iron and zinc on tuber yield and yield components of potato. *Journal of Crop Ecophysiology*, 9, 177-190. (In Persian)
20. Jeong, J., & Guerinot, M.L. (2009). Homing in on iron homeostasis in plants. *Trends in Plant Science*, 14(5), 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.02.006>
21. Khodadadi-Karooki, A., Yavarzadeh, M.R., Akbarian, M.M., & Askari, A. (2020). Effect of iron and magnesium nanoparticles and planting date on yield and nitrate content in potato tubers. *Journal of Plant Production Science*, 10, 41-54.
22. Lafmejani, Z.N., Jafari, A.A., Moradi, P., & Moghadam, A.L. (2018). Impact of foliar application of iron-chelate and iron nano particles on some morpho-physiological traits and essential oil composition of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil Bear Plants*, 21, 1374-84. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1556122>
23. Liu, X., Feng, Z., Zhang, S., Zhang, J., Xiao, Q., & Wang, Y. (2006). Preparation and testing of cementing nano-subnano composites of slower controlled release of fertilizers. *Scientia Agriculture Sinica*, 39, 1598-1604. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(06\)60113-2](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(06)60113-2)

24. Liu, X., Chen, Q., Hy, Q., Xue, N., & Seung, L.K. (2008). Evaluation of the role of mixed amino acids in nitrate uptake and assimilation in leafy radish by using 15 N labeled nitrate. *Agricultural Sciences in China*, 7(10), 1196-1202. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60164-9](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60164-9)
25. Mahil, E.I.T., & Kumar, B.N.A. (2019). Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops. A review. *Journal of Farm Science*, 32(3), 239-249.
26. Manivannan, P., Jaleel, C.A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2008). Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Comptes Rendus Biologies*, 331, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.03.003>
27. Mazaherinia, S., Astaraei, A.R., Fotovat, A., & Monshi, A. (2010). Studying effect of iron oxide (ordinary and nano) together with sulfur granular compost on iron concentration and growth of Atyla cultivar of wheat. *Iranian Journal of Crop Research*, 8, 855-861. (In Persian)
28. Mirzashahi, K., Nourgholipour, F., & Samavat, S. (2017). Effects of two Fe-fertilizers on yield and yield components of soybean grown in the north of Khuzestan. *Land Management Journal*, 4, 191-201. <https://doi.org/10.22092/lmj.2017.109490>
29. Monsef-Afshar, R., Hadi, H., & Pirzad, A. (2012). Effect of spraying nano-iron on characteristics qualitative and quantitative of cowpea, under drought stress end of season. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(8), 1709-1717.
30. Naderi, M.R., & Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19), 2229-2232.
31. Paech, K., & Tracey, M.V. (2013). *Modern Methods of Plant Analysis*. Springer Science and Business Media. 766 pp.
32. Parvizi, K., & Navaei, A. (2019). Evaluation of potato growth traits by inoculation of mycorrhiza under drought stress conditions. *Journal of Plant Research*, 32, 328-340. (In Persian). <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9051-z>
33. Pirzad, A., Zardashti, M., & Mazloumi, M. (2012). *The effect of foliar iron nanoparticles in different growth stages on some physiological Characteristics and yield of sugar beet root*. 12th Iranian Congress of Agronomy and Plant Breeding. Islamic Azad University of Karaj, June 13. p. 576. (In Persian).
34. Prasad, T.N.V., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R., & Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscales zinc oxide on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 905-927. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443>
35. Ranjbar, M., & Shams, G.A. (2009). Using of nanotechnology. *Journal of Environment Green*, 3, 29-34. (In Persian).
36. Rawashdeh, H.M., & Florin, S. (2015). Foliar application with iron as a vital factor of wheat crop growth, yield quantity and quality, A review. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 3(9), 368-376.
37. Sheykhabglo, R., Sedghi, M., Tajbakhsh shishevan, M., & Sharifi, R. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), 112-113. <https://doi.org/10.15835/nsb224667>
38. Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N., & Panwar, J. (2015). *Nano-fertilizers and their smart delivery system*. In M. Rai., C. Ribeiro, L. Mattoso & N. Dura (Eds.), *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. pp. 81-101. Springer International Publishing, Cham, Switzerland
39. Struik, P.C. (2007). The canon of potato science, Minutubers. *Potato Research*, 50, 305-308. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9051-z>
40. Timsina, Y.N. (2013). Effect of nitrogen fertilization on zinc and iron uptake and yield components of wheat. Department of Plant and Environmental Sciences, (IPM). Norwegian University of Life Sciences (UMB), pp. 94.
41. Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*, Sinauer Associates. 3th edition. Hardcover. 690 pp.
42. Wang, L., Liu, B., Wang, Y., Qin, Y., Zhou, Y., & Qian, H. (2020). Influence and interaction of iron and lead on seed germination in upland rice. *Plant Soil*, 455, 187-202. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04680-4>
43. Zhang, R., Zhang, W., Kang, Y., Shi, M., Yang, X., Li, H., Yu, H., Wang, Y., & Qin, S. (2022). Application of different foliar iron fertilizers for improving the photosynthesis and tuber quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) and enhancing iron biofortification. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 3-14. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00346-8>
44. Zhao, J.H., Sun, J.H., & Li, W.Q. (2018). Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 26(11), 1634-1164. <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180132>