ارزیابی تغذیه غلظت‌های مختلف نانو و میکرو سیلیسیم بر فتوسنتز و رنگیزه‌های گیاهچه‌های سیب زمینی در کشت هیدروپونیک

محمد کافی* و بیژن سعادتیان

گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ١٣٩٤/٠٨/١٥، تاریخ پذیرش نهایی: ١٣٩٤/١٢/٠٨)

چکیده:

این پژوهش با هدف بررسی نقش تغذیه‌ای و کارایی ذرات نانو و میکرو سیلیسیم بر پارامترهای فتوسنتزی و رنگیزه‌های برگ سیب زمینی رقم اگریا در شرایط کشت بدون خاک بود. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ١٣٩٢ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل دو سطح اندازه ذره سیلیکات سدیم (نانو و میکرو) و سه سطح غلظت (٠/٣، ٠/٦ و ٠/٩ میلی‌مولار) و شاهد بود. نتایج نشان دهنده تأثیر معنی‌دار اثر غلظت و اثر متقابل اندازه ذرات و غلظت بر صفات غلظت کلروفیل a، b، کلروفیل کل، نسبت a به b، کاروتنوئیدها، فتوسنتز، دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای، هدایت روزنه‌ای، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و هدایت مزوفیلی برگ سیب زمینی بود. در غالب صفات مورد بررسی، غلظت ٠/٣ میلی‌مولار سیلیسیم تأثیر مثبت و معنی‌داری بر صفات فتوسنتزی به همراه داشت؛ اما در غلظت‌های بالاتر، افزایش سیلیسیم در هر دو اندازه بر صفات فوق تأثیر منفی گذاشت و نانو ذرات در مقایسه با ذرات میکرو دارای اثرات منفی شدیدتری بر صفات مورد بررسی بودند. همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین صفات فتوسنتز، هدایت مزوفیلی، کارایی مصرف آب لحظه‌ای، غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کل در کلیه تیمارها مشاهده شد. در مقابل، غلظت دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای با تمامی صفات فوق الذکر همبستگی منفی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: سیلیکات سدیم، کارایی مصرف آب، کشت بدون خاک، محلول غذایی.

مقدمه:

سیلیسیم یکی از مهمترین عناصر فراوان در پوسته زمین است و اگرچه به عنوان یک عنصر ضروری برای غالب گیاهان معرفی نشده، اما حضور آن در محیط رشد گیاه باعث بروز اثرات مثبت در بسیاری از گونه‌ها شده (Epstein, 1999; Currie and Perry, 2007; Zuccarini, 2008) و در کاهش اثرات تنش‌های محیطی نقش مهمی ایفا می‌نماید (Liang *et al*., 1996; Liang, 1998; Currie and Perry, 2007; Zuccarini, 2008; Mateos-Naranjo *et al*., 2013; Haghighi and Pessarakli, 2013). تاثیرات سیلیسیم به غلظت و گونه گیاهی وابسته است (Parveen and Ashraf, 2010). به اعتقاد برخی محققان تأثیر سیلیسیم ممکن است به دلیل رسوب سیلیسیم در پهنک برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و حفاظت آنها از آفات و بیماری‌ها باشد (Adatia and Besford, 1986; Epstein, 1999; Liang, 1998; Asmar *et al*., 2013) و به دنبال آن پایداری غشاهای زیستی را موجب شود

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: m.kafi@um.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

(Liang *et al*., 1996; Haghighi and Pessarakli, 2013). همچنین سیلیسیم غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ را افزایش داده (Adatia and Besford, 1986; Liang, 1998; Asmar *et al*., 2013) و از این طریق توانایی گیاه برای استفاده موثرتر از نور را بالا خواهد برد (Adatia and Besford, 1986). سیلیسیم سبب افزایش غلظت آنزیم فتوسنتزی ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز در برگ‌ها می‌گردد. این آنزیم سوخت و ساز دی اکسید کربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی اکسید کربن توسط گیاه را افزایش می‌دهد و در نهایت موجب بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (Adatia and Besford, 1986). تحقیقات انجام شده بر روی گیاهان مختلفی از جمله لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) (Zuccarini, 2008)، موز (*Musa sapientum*) (Asmar *et al*., 2013)، خیار (*Cucumis sativus*) (Jian-peng *et al*., 2009)، ذرت (*Zea mays*) (Parveen and Ashraf, 2010) و گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) (Haghighi and Pessarakli, 2013) نشان دهنده تأثیر سیلیسیم بر پارامترهای فتوسنتزی گیاهان در شرایط مختلف رشد است. در تحقیقی سیلیسیم با بهبود فعالیت فتوسنتزی، افزایش کلروفیل برگ و تغییر ساختاری در سلول های برگ جو (*Hordeum vulgare* L.) از شدت تنش شوری کاست (Liang, 1998). همچنین در بررسی دیگر، سیلیسیم محتوای کلروفیل a، b و مجموع آنها را در برگ ارقام گندم (*Triticum sativum* L.) به طور معنی‌داری افزایش داد. در ادامه نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر سیلیسیم بر صفات یاد شده در شرایط نرمال و تنش به ترتیب در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار سیلیسیم حاصل گردید (Tuna *et al*., 2008).

به دلیل آلودگی‌های ویروسی در مزارع، امکان انبارداری و کشت مجدد غده‌های سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) وجود ندارد. بدین جهت امروزه از روش ریز ازدیادی برای تکثیر غده‌های بذری استفاده می‌شود (Ozturk and Yildirim, 2010) و تنها روشی است که امکان تولید محصول عاری از ویروس‌ها را فراهم می‌آورد (Kanwal *et al*., 2006). در این روش ابتدا از بافت مریستمی گیاهچه‌های عاری از بیماری در محیط کشت تولید شده، سپس گیاهچه‌ها جهت تولید مینی تیوبر به بسترهای کشت در گلخانه منتقل می‌گردند (Ritter *et al*., 2001; Farran and Mingo-Castel, 2006).

بوته‌های سیب زمینی با محلول‌های غذایی تغذیه می‌شوند، اما مصرف عنصر سیلیسیم در محلول‌های غذایی جایگاهی ندارد. در صورتی که این عنصر اگرچه غیر ضروری نیست، اما عنصری مفید برای رشد گیاهان بشمار می‌آید (سعادتیان و کافی، ۱۳۹٤; Epstein, 1999). یافته‌ها نشان داده که جذب سیلیسیم توسط سیب زمینی به صورت غیر فعال بوده و با افزایش مقدار سیلیسیم در محیط، غلظت آن در بافت‌های گیاهی افزایش می‌یابد (Adatia and Besford, 1986). همانطور که قبلاً اشاره شد، نتایج سایر تحقیقات انجام شده حاکی از تاثیرات مثبت سیلیسیم بوده است (Parveen and Ashraf, 2010; Haghighi and Pessarakli, 2013). از این رو به نظر می‌رسد استفاده از این عنصر در محلول غذایی جهت تولیدات گلخانه‌ای و بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی گیاهان می‌تواند مفید باشد.

امروزه نانو مواد به دلیل اندازه کوچک، خصوصیات منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و می‌توانند خصوصیات فیزیکو- شیمیایی را در مقایسه با شکل متداول مواد تغییر دهند (سعادتیان و کافی، ۱۳۹٤). ذرات نانو در مقایسه با ذرات متداول از سطح بیشتری برخوردارند و این ویژگی امکان افزایش حلالیت و واکنش پذیری سطحی را فراهم می‌نماید (Ruffini and Cremonini, 2009). توسعه تکنولوژی موجب توسعه کاربرد مواد نانو در رشته‌های مختلف علمی و صنعتی شده است. اگرچه در بخش کشاورزی به دلیل احتیاط‌های موجود، پیشرفت با روند کندی همراه است (Dietz and Herth, 2011)، اما استفاده از نانو ذرات مورد توجه بسیاری از محققین رشته کشاورزی قرار گرفته است (Haghighi and Pessarakli, 2013). ریزغده‌های سیب زمینی مصرف خوراکی نداشته و بذرهای تولیدی پس از چند نسل تکثیر در مزرعه در اختیار کشاورزان قرار خواهند گرفت، از این رو استفاده از ترکیبات نانو در فرایند تولید بذر اولیه چالشی به همراه نخواهد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

داشت (سعادتیان و کافی، ۱۳۹٤). با توجه به اثرات سودمند سیلیسیم بر خصوصیات گیاهان مختلف، به نظر می‌رسد که استفاده از آن در محلول غذایی تغییرات فیزیولوژیکی مثبتی در پی خواهد داشت. همچنین رویکرد نوین استفاده از نانو ذرات در تولیدات کشاورزی، امکان توسعه این بخش را فراهم خواهد ساخت. لذا این تحقیق با هدف بررسی اثر کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی بر پارامترهای فتوسنتزی و محتوای کلروفیل گیاهچه‌های سیب زمینی و همچنین مقایسه کارایی ذرات نانو و میکرو انجام شد.

مواد و روش‌ها:

پژوهش حاضر در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۲ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل اندازه ذره سیلیکات سدیم در دو سطح نانو و میکرو و غلظت آن در سه سطح ۰/۳، ۰/٦ و ۰/۹ میلی‌مولار و شاهد بود.

ابتدا گره‌های ساقه سیب زمینی در محیط کشت موراشیک و اسکوگ (MS) تکثیر شده و پس از یک ماه گیاهچه‌های حاصل جهت انتقال به گلخانه از محیط درون شیشه‌ای خارج شدند. در این آزمایش از رقم اگریا به دلیل سطح زیر کشت بالای آن در ایران استفاده شد. گیاهچه‌ها در بستر بدون خاک حاوی پرلیت، کوکوپیت و ماسه به نسبت‌های ٤:۳:۳ کشت شدند. نیمی از بستر در زمان نشاء و نیم دیگر آن در دو مرحله به پای بوته‌ها اضافه شد (سعادتیان و کافی، ۱۳۹٤). هر بوته در یک گلدان پلاستیکی با قطر دهانه ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر قرار گرفت و هر تکرار شامل چهار گیاهچه بود. هفته‌ای یک بار گیاهچه‌های سیب زمینی با محلول غذایی هوگلند حاوی تیمارهای غلظت سیلیکات سدیم تغذیه شدند. اسیدیته محلول توسط اسید سولفوریک ۰/۱ مولار در حد ٥/٦ با کمک pH متر مدل ۷٤٤ (Metrohm) تنظیم گردید. دمای روز و شب گلخانه به ترتیب ۲±۲٤ و ۲±۱۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ٤۰ درصد بود (Haghighi and Pessarakli, 2013). نور ورودی به گلخانه نور طبیعی خورشید بود و مقدار آن به طور متوسط در ساعت ۱٤ ظهر روز آفتابی ۱۷۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه بود. که توسط نورسنج نقطه‌ای اندازه‌گیری و ثبت گردید. از نانو ذرات سیلیکات سدیم با میانگین قطر ٦۸ نانومتر و درجه خلوص ۹۹/۹ درصد و به حالت جامد بی رنگ (سعادتیان و کافی، ۱۳۹٤) در این آزمایش استفاده شد. میانگین قطر ذرات میکرو، ۲/۳۷۱ میکرومتر بود.

در پایان هفته ششم پس از کاشت و همزمان با آغاز مرحله غده‌دهی، از هر بوته بالاترین برگ جوان کاملاً توسعه یافته انتخاب و پارامترهای فتوسنتزی برگ، شامل فتوسنتز خالص (A) بر حسب میکرومول دی اکسید کربن (CO_2) تثبیت شده بر مترمربع برگ در ثانیه، تعرق (E) بر حسب میلی‌مول آب (H_2O) بر مترمربع در ثانیه، غلظت دی اکسید کربن زیر اتاقک روزنه‌ای (C_i) برحسب میکرومول دی اکسید کربن بر مول، هدایت روزنه‌ای (g_s) برحسب مول آب بر مترمربع در ثانیه و دمای برگ بر حسب درجه سانتی‌گراد با دستگاه IRGA مدل LCi Consol تعیین شد. کارایی مصرف آب لحظه‌ای از تقسیم فتوسنتز به تعرق بر حسب میکرومول دی اکسید کربن تثبیت شده بر میلی‌مول آب خارج شده به دست آمد (Haghighi and Pessarakli, 2013). هدایت مزوفیلی ظاهری نیز از طریق تقسیم فتوسنتز به دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برحسب مول دی اکسید کربن بر مترمربع در ثانیه محاسبه شد (Ahmadi and Siosemardeh, 2005)

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a، b (Arnon, 1949) و کاروتنوئیدها (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. برای این منظور در ششمین هفته از شروع آزمایش، از هر تیمار یک برگ جوانه کاملاً توسعه یافته جدا و داخل یخ خشک به آزمایشگاه منتقل شد. سپس ۱۰۰ میلی‌گرم از قسمت نوک برگ توزین و با نیتروژن مایع هموژنایز گردید. استخراج رنگدانه‌ها با استفاده از متانول ۹۹ درصد انجام شد. میزان جذب در طول موج‌های ٤۷۰، ٦٥۳ و ٦٦٦ نانومتر با استفاده از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

اسپکتروفوتومتر Jenway UV/Vis مدل ٦۳۰۵ اندازه‌گیری شد و براساس رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ مقادیر کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها محاسبه گردید. برای به دست آوردن کلروفیل کل، مقادیر کلروفیل a و b حاصل از رابطه‌های ۱ و ۲ در رابطه ٤ باهم جمع شد (Haghighi and Pessarakli, 2013).

رابطه (۱): $Chl_a = 15.65 \times A_{666} - 7.34 \times A_{653}$

رابطه (۲): $Chl_b = 27.05 \times A_{653} - 11.21 \times A_{666}$

رابطه (۳):

$$C(x+c) = (1000 \times A_{470} - 1.63 \times Chl_a - 104.96 \times Chl_b) / 221$$

رابطه (٤) $chlt = chla + chlb$

آنالیز واریانس داده‌ها و تعیین ضرایب همبستگی بین صفات، توسط نرم افزار SAS (ver 9.1) و مقایسه میانگین صفات با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت شده (PLSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج:

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح غلظت سیلیکات سدیم بر صفات مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، مجموع و نسبت کلروفیل a و b و مقدار کاروتنوئیدها معنی‌دار (P≤۰/۰۱) بود (جدول ۱). همچنین اثر متقابل اندازه ذرات سیلیکات سدیم و سطوح غلظت آن در تمامی صفات ذکر شده، معنی‌دار گردید. اما در هیچ یک از صفات، اثر اصلی اندازه ذرات سیلیکات سدیم معنی‌دار نشد (جدول ۱).

مقدار کلروفیل a در غلظت ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیکات سدیم در مقایسه با سطح صفر (شاهد) افزایش معنی داری نشان داد (جدول ۲). اما با مصرف غلظت‌های ۰/٦ و ۰/۹ میلی‌مولار نانو ذرات، مقدار کلروفیل a برگ کاهش یافت (جدول ۲). تأثیر مثبت ذرات میکرو سیلیکات سدیم تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار بود. به طوری که نسبت به شاهد افزایشی ۱۳ درصدی نشان داد. همانند نانو ذرات، ذرات میکرو نیز در غلظت‌های بالاتر اثر منفی و معنی‌داری بر مقدار کلروفیل a داشت (جدول ۲). اگرچه تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات، افزایش ۷ درصدی در مقدار کلروفیل b نسبت به شاهد مشاهده شد. اما با افزایش سیلیسیم، مقدار کلروفیل b در مقایسه با سطح ۰/۳ میلی‌مولار کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). به جز سطح ۰/۹ میلی‌مولار در سایر سطوح کاربرد ذرات میکرو، کلروفیل b نسبت به شرایط عدم مصرف (شاهد) به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۲). در هر دو سطح اندازه ذره، بالاترین مقادیر مجموع کلروفیل برگ در تیمار ۰/۳ میلی‌مولار سیلیسیم بدست آمد. اما با افزایش غلظت سیلیسیم از سطح یاد شده، اثر منفی مصرف سیلیسیم مشهود بود و نانو ذرات در مقایسه با ذرات میکرو اثر شدیدتری داشتند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در صفات مقدار کلروفیل a، b برگ و مجموع آنها، غلظت ۰/۳ میلی‌مولار سطح بهینه مصرف هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم بود و تفاوت آماری نیز بین آنها در غلظت یاد شده وجود نداشت. اما با افزایش مقدار سیلیسیم از ۰/۳ میلی‌مولار، با کاهش صفات مقدار کلروفیل a، b برگ و مجموع آنها اثرات کاهشی ناشی از بیش بود سیلیسیم در برگ سیب زمینی نمایان گردید. تنها در سطح ۰/۹ میلی‌مولار، تفاوتی بین اندازه ذره از نظر صفت مجموع کلروفیل برگ مشاهده نشد (جدول ۲). سطوح مختلف ذرات نانو تاثیری بر نسبت کلروفیل a به b نداشت. اما غلظت ۰/٦ میلی‌مولار ذرات میکرو، سبب کاهش معنی‌دار این نسبت در مقایسه با شاهد گردید (جدول ۲). مصرف ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیکات سدیم، مقدار کاروتنوئیدهای برگ سیب زمینی را به طور معنی‌داری افزایش داد. اما در غلظت‌های بالا، مقدار کاروتنوئیدهای برگ از نظر آماری حتی پایین‌تر از شاهد بود. تنها در غلظت ۰/٦ میلی‌مولار ذرات میکرو نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در مقدار کاروتنوئیدها مشاهده شد (جدول ۲).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس پارامترهای فتوسنتزی حاکی از اثر معنی‌دار اندازه ذرات سیلیسیم بر صفات فتوسنتز، تعرق، دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای، هدایت روزنه‌ای، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و هدایت مزوفیلی برگ سیب زمینی بود (جدول ۳). اثر اصلی غلظت سیلیسیم نیز بر صفات ذکر شده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مرتبط با محتوای کلروفیل برگ سیب زمینی رقم اگریا در محیط کنترل شده و کشت هیدروپونیک.

منابع تغییر	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)				
		کلروفیل a	کلروفیل b	a+b	a/b	کاروتنوئیدها
تکرار	۲	۹٤^{ns}	٤۹۱^{ns}	۹۵۱^{ns}	۰/۰۰۰۷^{ns}	۱۵/۲**
اندازه ذرات (D)	۱	۹۹^{ns}	٦۰۹^{ns}	۱۲۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۷^{ns}	۳/٦^{ns}
غلظت (M)	۳	۹۳۳۵**	۲۹۰۱**	۲۲۵۱۰**	۰/۰۰۵۸**	۳٤/۵**
D×M	۳	۵۸۲*	۱۷۲۸**	٤۰۰۹**	۰/۰۰۱۸*	٤۸٤/۸**
خطا	۱٤	۱۳۵	۱٦۵	٤۱۱	۰/۰۰۰٦	۲/٤
ضریب تغییرات (٪)	-	۲/۲	۲/۳	۲/۰	۲/۵	٤/۰

ns،*و به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.**

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل اندازه ذرات سیلیسیم و غلظت‌های آن، بر صفات مرتبط رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ سیب زمینی رقم اگریا در کشت هیدروپونیک.

اندازه ذره سیلیکات سدیم	غلظت (mM)	صفت				
		کلروفیل a (µg/gfw)	کلروفیل b (µg/gfw)	کلروفیل کل (µg/gfw)	a/b	کاروتنوئیدها (µg/gfw)
نانو	صفر	۵٤۳±۹^{b}	۵۵۵±۲^{b}	۱۰۹۸±۱۱^{bc}	۰/۹۸±۰/۰۱^{bc}	٤۱/۹±۲^{c}
	۰/۳	٦۰٦±۵^{a}	۵۹۵±٦^{a}	۱۲۰۲±۱۰^{a}	۱/۰۲±۰/۰۱^{ab}	۵۰/٦±۳^{a}
	۰/٦	۵۱۳±۸^{d}	۵۲۰±۱۱^{c}	۱۰۳۳±۱۹^{e}	۰/۹۹±۰/۰۱^{bc}	۳۱/۳±۱^{d}
	۰/۹	۵۳۵±۱۵^{bc}	۵٤۵±۲۷^{b}	۱۰۸۰±۲۷^{cd}	۰/۹۸±۰/۰٦^{bc}	۳۲/۹±۲^{d}
میکرو	صفر	۵٤۳±۹^{b}	۵۵۵±۲^{b}	۱۰۹۸±۱۱^{bc}	۰/۹۸±۰/۰۱^{bc}	٤۱/۹±۲^{c}
	۰/۳	٦۱۳±۵^{a}	۵۸٦±۷^{a}	۱۱۹۸±۱۲^{a}	۱/۰۵±۰/۰۱^{ab}	۲٤/۷±۲^{e}
	۰/٦	۵٤۲±۱۰^{b}	۵۸۰±۳^{a}	۱۱۲۲±۱۳^{b}	۰/۹۳±۰/۰۱^{d}	٤۷/۱±۲^{b}
	۰/۹	۵۱٦±۲۰^{cd}	۵۳۵±۲۵^{bc}	۱۰۵۱±٤۵^{de}	۰/۹٦±۰/۰۱^{cd}	۳۹/۹±۱^{c}

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD ندارند.

معنی‌دار گردید (جدول ۳). اثر متقابل اندازه ذرات و غلظت در صفات فتوسنتز، تعرق، دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای، هدایت روزنه‌ای، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و هدایت مزوفیلی معنی‌دار شد (جدول ۳).

اگرچه غلظت ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیسیم در مقایسه با شاهد (سطح صفر) تأثیر معنی‌داری بر فتوسنتز برگ سیب زمینی نداشت، اما افزایش غلظت نانو ذرات سیلیسیم از سطح یاد شده موجب نقصان فتوسنتز شد. به طوری که این صفت، در غلظت‌های ۰/٦ و ۰/۹ میلی‌مولار نسبت به شاهد به ترتیب ۲۷ و ۳٦ درصد کاهش نشان داد. تأثیر ذرات میکرو تا سطح ۰/٦ میلی‌مولار بر فتوسنتز برگ مثبت بود و بیشترین مقدار آن در سطح ۰/۳ میلی‌مولار سیلیسیم بدست آمد. در بالاترین سطح غلظت (۰/۹ میلی‌مولار)، تأثیر منفی ذرات میکرو بر فتوسنتز برگ نمایان گردید. به طوری که از این نظر با ذرات نانو در سطح ذکر شده تفاوت آماری نداشت (جدول ٤). تعرق برگی بوته‌های تیمار شده با نانو ذرات تا غلظت ۰/٦

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

جدول ۳- تجزیه واریانس پارامترهای فتوسنتزی برگ سیب زمینی رقم اگریا در محیط کنترل شده و کشت هیدروپونیک.

منابع تغییر	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)					
		فتوسنتز	تعرق	CO_2 زیر روزنه‌ای	هدایت روزنه‌ای	کارایی مصرف آب لحظه‌ای	هدایت مزوفیلی برگ
تکرار	۲	۰/۱۰٤^{ns}	۰/۰۰٦^{ns}	۷۹/٦^{ns}	۰/۰۰۰۵^{ns}	۰/۰۱۱**	۱۵/٦×۱۰$^{-۷*}$
اندازه ذرات (D)	۱	۲/۸۹۸**	۰/۰٤۸**	۱٦۵/٤*	۰/۰۱۰٤**	۰/۵٤۱**	۱۸/۷×۱۰$^{-٦**}$
غلظت (M)	۳	۵/٦۱۹**	۰/۱۵٤**	۷۰٤/٤**	۰/۰۰۳۲**	۱/۵۲٤**	۵۹/۷×۱۰$^{-٦**}$
D×M	۳	۱/۱۰۸**	۰/۳۲٤**	۱۵٤٤/۷**	۰/۰۰٤٤**	۰/۲۰۹**	۱٦/۳×۱۰$^{-٦**}$
خطا	۱٤	۰/۰۳۰	۰/۰۰٤	۲۳/۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۳/۳×۱۰$^{-۷}$
ضریب تغییرات (٪)	–	۳/۸	۲/۸	۱/٦	۸/۱	۲/۰	٤/۲

ns،*و** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل اندازه ذرات سیلیسیم و غلظت‌های آن، بر پارامترهای فتوسنتزی برگ سیب زمینی رقم اگریا در کشت هیدروپونیک.

اندازه ذره سیلیکات سدیم	غلظت (mM)	صفت					
		فتوسنتز ($\mu mol\ CO_2$) ($m^{-2}\ s^{-1}$)	تعرق ($mmol\ H_2O$) ($m^{-2}\ s^{-1}$)	CO_2 زیر روزنه‌ای ($\mu mol\ CO_2$) (mol^{-1})	هدایت روزنه‌ای ($mol\ H_2O$) ($m^{-2}\ s^{-1}$)	کارایی مصرف آب لحظه‌ای ($\mu mol\ CO_2$ / $mmol\ H_2O$)	هدایت مزوفیلی برگ ($mol\ CO_2$) ($m^{-2}\ s^{-1}$)
نانو	صفر	۵/۰۵±۰/۲٤^{c}	۲/۱۷±۰/۰۹^{cde}	۳٤۳±٦^{b}	۰/۱۹±۰/۰۰٦^{b}	۲/۳۳±۰/۰۷^{b}	۰/۰۱٤±۰/۰۰۱۰^{b}
	۰/۳	۵/۰٦±۰/۱٦^{c}	۲/۰۹±۰/۰۵^{e}	۳۰۹±۳^{d}	۰/۱۸±۰/۰۱۵^{bc}	۲/٤۲±۰/۰٤^{a}	۰/۰۱٦±۰/۰۰۰٤^{a}
	۰/٦	۳/٦۸±۰/۱۸^{d}	۲/۲٤±۰/۰۲^{cd}	۳۵۳±٤^{a}	۰/۱۸±۰/۰۰٦^{bc}	۱/٦٤±۰/۰۷^{c}	۰/۰۱۰±۰/۰۰۰٦^{c}
	۰/۹	۳/۲۲±۰/۱۰^{e}	۲/۹۱±۰/۰٤^{a}	۳۵٦±۸^{a}	۰/۲۸±۰/۰٤۰^{a}	۱/۱۱±۰/۰٤^{e}	۰/۰۰۹±۰/۰۰۰٤^{d}
میکرو	صفر	۵/۰۵±۰/۲٤^{c}	۲/۱۷±۰/۰۹^{cde}	۳٤۳±٦^{b}	۰/۱۹±۰/۰۰٦^{b}	۲/۳۳±۰/۰۷^{b}	۰/۰۱٤±۰/۰۰۱۰^{b}
	۰/۳	۵/۹۳±۰/۲۵^{a}	۲/٤۳±۰/۰۷^{b}	۳۵۷±۷^{a}	۰/۱۷±۰/۰۱۰^{bcd}	۲/٤۳±۰/۰۳^{a}	۰/۰۱۷±۰/۰۰۰۸^{a}
	۰/٦	۵/۵۲±۰/۲۰^{b}	۲/۲۸±۰/۰٦^{c}	۳۲۲±۹^{c}	۰/۱۵±۰/۰۰۷^{d}	۲/٤۲±۰/۰۵^{a}	۰/۰۱۷±۰/۰۰۰٦^{a}
	۰/۹	۳/۲۹±۰/۱۵^{e}	۲/۱٦±۰/۰۵^{de}	۳٦۰±۵^{a}	۰/۱٦±۰/۰۱۰^{cd}	۱/۵۲±۰/۰٤^{d}	۰/۰۰۹±۰/۰۰۰۵^{d}

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD ندارند.

میلی‌مولار با شاهد تفاوت نشان نداد. اما در بالاترین سطح نانو ذرات مقدار آن به طور معنی‌داری افزایش یافت. به طوری که در بین تمامی ترکیبات تیماری، بیشترین مقدار بود. مصرف ذرات میکرو تنها در سطح ۰/۳ میلی‌مولار موجب افزایش تعرق برگ گردید و در سایر تیمارهای میکرو تفاوتی از این نظر با شاهد مشاهده نشد (جدول ٤). به طور کلی در هر یک از سطوح غلظت سیلیسیم، تیمار ذرات نانو در مقایسه با میکرو تأثیر کاهشی بر تعرق برگ داشت. مقدار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ در غلظت ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات نسبت به شرایط عدم مصرف سیلیسیم کاهش معنی‌داری نشان داد. در مقابل، مصرف ذرات میکرو در غلظت ذکر شده مقدار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ را به طور معنی‌داری افزایش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

داد. با افزایش غلظت نانو ذرات از سطح ۰/۳ میلی‌مولار، دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای افزایش آماری نشان داد. در بالاترین غلظت سیلیسیم، بیشترین مقدار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ بدست آمد و تفاوت آماری بین دو اندازه ذره وجود نداشت (جدول ٤).

روند تغییرات هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر دو اندازه ذره متفاوت بود به طوری که با مصرف ۰/۹ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیسیم، هدایت روزنه‌ای برگ افزایشی ٤٧ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد. در مقابل، با کاربرد ذرات میکرو در محلول غذایی هوگلند، هدایت روزنه‌ای برگ در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت. اما بین سطوح غلظت ذرات میکرو تفاوتی مشاهده نشد (جدول ٤). نانو ذرات سیلیسیم تنها در تیمار ۰/۳ میلی‌مولار تأثیر مثبت بر کارایی مصرف آب برگ سیب زمینی داشت و با افزایش غلظت از سطح یاد شده، کارایی مصرف آب برگ در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد. به طوری که کمترین مقدار کارایی مصرف آب در بین تمامی تیمارهای آزمایشی در غلظت ۰/۹ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیکات سدیم بدست آمد (جدول ٤). کاربرد ذرات میکرو در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/٦ میلی‌مولار، کارایی مصرف آب برگ را به طور معنی‌داری افزایش داد. اما در بالاترین غلظت آن، کارایی مصرف آب برگ در مقایسه با شاهد ۳٤/۷ درصد کاهش نشان داد (جدول ٤). در تیمار نانو ذرات، تنها غلظت ۰/۳ میلی‌مولار هدایت مزوفیلی برگ را در مقایسه با شاهد افزایش داد. سایر سطوح نانو ذرات اثر منفی بر هدایت مزوفیلی برگ داشت (جدول ٤). غلظت‌های ۰/۳ و ۰/٦ میلی مولار ذرات میکرو سیلیسیم در مقایسه با شاهد هدایت مزوفیلی برگ را به طور معنی‌داری افزایش دادند. اما در بالاترین سطح غلظت، تأثیر ذرات میکرو بر صفت مذکور منفی بود و از این نظر تفاوتی بین دو اندازه ذره وجود نداشت (جدول ٤).

بحث:

برخی یافته‌ها بیانگر تأثیر مثبت سیلیسیم بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ بوده است. به طوری که Tuna و همکاران (۲۰۰۸) با کاربرد سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم در محلول غذایی، گزارش کردند که مصرف ۰/۲۵ میلی مولار سیلیسیم، مقدار کلروفیل a، b و مجموع آنها را در برگ گندم (رقم ازمیر-۸۵) به ترتیب ۱۲، ٤۰ و ۲۱ درصد افزایش داد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر نتایج حاکی از اثر مثبت و معنی‌دار کاربرد ترکیبات مختلف سیلیسیم در محیط کشت بر مقادیر کلروفیل a، b و مجموع آنها در گیاهچه‌های موز بود، به طوری که مقادیر صفات بیان شده در تیمار مصرف یک گرم بر لیتر سیلیکات سدیم نسبت به شاهد به ترتیب ۱۵، ۲۲ و ۱٦ درصد افزایش داشت (Asmar *et al*., 2013). نتایج این بررسی مطابق یافته‌های فوق الذکر، نشان دهنده تأثیر مثبت غلظت مناسب سیلیسیم بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی سیب زمینی بود. اما گزارش Mateos-Naranjo و همکاران (۲۰۱۳) بیانگر عدم تأثیر مثبت سیلیسیم (از منبع سیلیکات سدیم) در محلول هوگلند بر مقادیر کلروفیل a، b و کاروتنوئیدهای گیاه هالوفیت *Spartina densiflora* بود. همچنین یافته‌ها نشان داده که اضافه کردن سیلیسیم به محلول غذایی، تاثیری بر مقدار کلروفیل برگ گوجه فرنگی نداشت (Haghighi and Pessarakli, 2013). در ادامه، Jian-peng و همکاران (۲۰۰۹) اگرچه با کاربرد سیلیکات سدیم (۰/۱ میلی‌مولار) در محلول غذایی، افزایش اندکی در مقدار کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها مشاهده کردند. اما این افزایش نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیسیم معنی‌دار نبود. به اعتقاد Parveen and Ashraf (۲۰۱۰) تأثیر سیلیسیم بر فعالیت‌های گیاهی به گونه و شرایط رشدی گیاه بستگی دارد. لذا تناقض‌های موجود در مطالعات صورت گرفته بر روی رنگیزه-های فتوسنتزی می‌تواند به علت تفاوت در منابع سیلیسیم به کار برده شده و همچنین گونه و شرایط محیطی باشد.

یافته‌های Haghighi and Pessarakli (۲۰۱۳) حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین اندازه ذرات نانو و میکرو در صفت شاخص کلروفیل برگ بود. در این تحقیق نیز اگرچه اثرات متقابل اندازه ذرات و سطوح غلظت سیلیسیم معنی‌دار گردید، اما تأثیر اندازه ذرات سیلیسیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی سیب

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

زمینی معنی‌دار نشد. همچنین در غالب صفات مرتبط با رنگیزه‌های فتوسنتزی، هر دو اندازه ذره روند مشابهی داشتند و در غلظت ۰/۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم بیشترین اثر مثبت را نشان دادند.

کلروفیل b به عنوان یک رنگیزه کمکی در افزایش بازه جذب نور برای فعالیت‌های فتوسنتزی عمل کرده بیشترین جذب را در طول موج‌های ٤٥٣ و ٦٤٢ نانومتر دارد. این رنگیزه نقش مهمی در تخفیف اثرات مخرب انرژی نورانی خورشید بر کلروفیل a (درمرکز واکنش نوری) برعهده دارد. نسبت کلروفیل a به b به نشان دهنده کیفیت جذب نور توسط گیاه است. همچنین از آنجا که کلروفیل b رنگیزه‌ای کمکی بشمار می‌آید، افزایش نسبت آن در مقایسه با کلروفیل a نشان دهنده ایجاد سپر حفاظتی توسط گیاه برای محافظت از هسته اصلی فتوسنتزی (کلروفیل a) می‌باشد. در مقابل، کاهش نسبی کلروفیل b نیز یکی از نشانه‌های وجود شرایط مطلوب فتوسنتزی و عدم نیاز به حفاظت نوری است (Ludish *et al*., 2000). همانطور که نتایج این تحقیق نشان داد، کاربرد غلظت ۰/۳ میلی‌مولار در هر دو سطح اندازه ذرات سیلیسیم، سبب افزایش نسبت کلروفیل a به کلروفیل b شد. از این رو می‌توان بیان داشت که غلظت یادشده سیلیسیم، تأثیر مثبت بر ساختار فتوسنتزی گیاهی داشته به طوری که غلظت نسبی کلروفیل a بیش از کلروفیل b (رنگیزه کمکی) شده است.

کلروفیل‌های a و b به عنوان اصلی‌ترین رنگیزه‌های فتوسنتزی به شمار می‌آیند. هرچند کلروفیل b رنگیزه‌ای کمکی است؛ اما طیف جذبی آن بسیار نزدیک به طیف جذبی کلروفیل a می‌باشد. از این رو نقش موثری در انتقال انرژی نورانی به کلروفیل a ایفا می‌نماید (Ludish *et al*., 2000). محتوای کلروفیل کل گیاه علاوه بر میزان سبزینگی، توان دریافت طول موج‌های مؤثر در فرایندهای فتوسنتزی را نیز نشان می‌دهد. از این رو به نظر می‌رسد که اعمال تیمار ۰/۳ میلی‌مولار هر دو اندازه ذرات سیلیسیم، نقش مثبتی در افزایش این رنگیزه‌ها داشته است.

تحت تأثیر غلظت ۰/۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم بیشترین مقدار فتوسنتز برگ بدست آمد. تأثیر مثبت سیلیسیم بر بهبود فتوسنتز برگ در گوجه فرنگی (Haghighi and Pessarakli, 2013; Romero-Aranda *et al*., 2006)، موز (Asmar *et al*., 2013)، *Spartina densiflora* (Mateos-Naranjo *et al*., 2013)، خیار (Feng *et al*., 2010) و جو (Liang, 1998) نیز گزارش شده است. کلروپلاست‌ها بیشتر در سلول‌های پارانشیم برگ تجمع می‌یابند و مولکول‌های مهم درگیر در فرایندهای فتوسنتز هستند. عنوان شده مقدار کلروفیل موجود در بافت‌های برگ ممکن است با توانایی فتوسنتزی ارتباط داشته باشد (Asmar *et al*., 2013). همچنین Liang (۱۹۹۸) اثرات سودمند سیلیسیم بر سرعت فتوسنتز خالص جو را به بهبود یافتن محتوای کلروفیل نسبت داد. در این آزمایش نیز فتوسنتز برگ با مقدار کلروفیل a، b و مجموع کلروفیل رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). به اعتقاد محققین افزایش سرعت فتوسنتز برگ در حضور سیلیسیم ممکن است مربوط به تغییرات ساختار آناتومیکی باشد که موجب افزایش کارایی جذب دی اکسید کربن و تولید کلرانشیم غنی از کلروفیل شده است (Asmar *et al*., 2013). از سویی دیگر نقش سیلیسیم بر افزایش غلظت آنزیم ریبولوز بی فسفات نیز می‌تواند یکی از دلایل افزایش فتوسنتز برگ باشد (Adatia and Besford, 1986). نتایج این بررسی نشان دهنده تأثیر متفاوت غلظت‌های مختلف سیلیسیم و اندازه ذرات بر پارامترهای فتوسنتزی برگ سیب زمینی بود و مطابق با یافته‌های Haghighi and Pessarakli (۲۰۱۳) در گیاه گوجه فرنگی و تحت شرایط نرمال، نانو ذرات برخلاف ذرات میکرو تأثیر منفی بر فتوسنتز برگ داشتند.

به طور کلی تحت تأثیر تیمارهای سیلیسیم، تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ دارای نتایج مشابهی بودند و رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین دو صفت برقرار بود (جدول ۵). همچنین ذرات میکرو تأثیر کمی بر تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ داشتند. نتایج Asmar و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داد تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ گیاهچه‌های موز تحت تأثیر هیچ یک از تیمارهای سیلیکات سدیم، پتاسیم و کلسیم قرار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

جدول ۵- همبستگی بین پارامترهای فتوسنتزی و رنگیزه‌های برگ سیب زمینی

صفت	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
فتوسنتز (۱)	۱									
تعرق (۲)	-۰/۳۰^{ns}	۱								
CO_2 زیر روزنه‌ای (۳)	-۰/٤۸*	۰/۳۷^{ns}	۱							
هدایت روزنه‌ای (٤)	-۰/٤۷*	۰/۷۳**	۰/۲۱^{ns}	۱						
کارایی مصرف آب لحظه‌ای (٥)	۰/۹٤**	-۰/٥۹**	-۰/٥۸**	-۰/٦۰**	۱					
هدایت مزوفیلی برگ (٦)	۰/۹۸**	-۰/۳٥^{ns}	-۰/٦٦**	-۰/٤٦*	۰/۹٥**	۱				
کلروفیل a (۷)	۰/۷۰**	-۰/۰۳^{ns}	-۰/٤۳*	-۰/۰۹^{ns}	۰/٦۱**	۰/۷۰**	۱			
کلروفیل b (۸)	۰/۷۳**	-۰/۱۱^{ns}	-۰/٥۹**	-۰/۲٤^{ns}	۰/٦۸**	۰/۷۸**	۰/۸۱**	۱		
کلروفیل کل (۹)	۰/۷٥**	-۰/۰۷^{ns}	-۰/٥۲**	-۰/۱٦^{ns}	۰/٦۷**	۰/۷۷**	۰/۹٦**	۰/۹٤**	۱	
کاروتنوئیدها (۱۰)	۰/۱٦^{ns}	-۰/٥۲**	-۰/۷۷**	-۰/۲۷^{ns}	۰/۳٦^{ns}	۰/۳۳^{ns}	-۰/۰۲^{ns}	۰/۳۰^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۱

ns،*و به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.**

نگرفت. گزارش Jian-peng و همکاران (۲۰۰۹) نیز حاکی از عدم تأثیر معنی‌دار سیلیسیم در شرایط عدم تنش بر هدایت روزنه‌ای برگ خیار بود. در تحقیقی دیگر، هدایت روزنه‌ای گیاه هالوفیت *Spartina densiflora* تحت تأثیر تیمارهای سیلیسیم قرار نگرفت (Mateos-Naranjo *et al.*, 2013). برخلاف ذرات میکرو، نانو ذرات سیلیکات سدیم در غلظت ۰/۹ میلی‌مولار بالاترین تأثیر معنی‌دار را بر تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ داشتند. منطبق با یافته‌های تحقیق حاضر، گزارش Haghighi and Pessarakli (۲۰۱۳) نشان دهنده تأثیر معنی‌دار نانو سیلیس بر تعرق برگ (در شرایط تنش ۵۰ میلی-مولار نمک کلرید سدیم) بود و در مقابل ذرات میکرو هیچ گونه تأثیر معنی‌داری بر صفت یاد شده نداشتند.

در این آزمایش هدایت مزوفیلی برگ با صفات فتوسنتز و دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای به ترتیب همبستگی مثبت (۰/۹۸**) و منفی (-۰/٦٦**) معنی‌داری داشت (جدول ۵). همچنین، همبستگی منفی و معنی‌داری بین مقدار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای و صفات کلروفیل a (-۰/٤۳*)، b (-۰/٥۹**)، کلروفیل کل (-۰/٥۲**) و فتوسنتز برگ (-۰/٤۸*) مشاهده شد (جدول ۵). همانطور که پیشتر بیان شد، رنگیزه‌های فتوسنتزی تأثیر مثبت و معنی‌داری در فتوسنتز برگ داشتند (جدول ۵). از روابط همبستگی اشاره شده و نتایج جدول مقایسه میانگین صفات فتوسنتزی می‌توان اینگونه بیان داشت که تأثیر مثبت تیمارهای ۰/۳ میلی‌مولار ذارت نانو و میکرو سیلیسیم بر رنگیزه‌های کلروفیلی موجب بهبود فتوسنتز برگ شده و به دنبال آن مصرف دی اکسید کربن در سلول‌های پارانشیمی افزایش یافته و با کاهش غلظت دی اکسید کربن در مزوفیل برگ، هدایت مزوفیلی بیشتر شده و در نتیجه جریان دی اکسید کربن به سمت سلول‌های پارانشیم سرعت گرفته و به دنبال آن از مقدار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ کاسته شده است. نتایج سایر مطالعات نیز نشان دهنده تأثیر سیلیسیم بر کاهش دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای است (Jian-peng *et al.*, 2009; Mateos-Naranjo *et al.*, 2013). در غلظت‌های بالاتر از ۰/۳ میلی‌مولار سیلیسیم، نانو ذرات اثرات منفی شدیدی بر فتوسنتز و هدایت مزوفیلی داشتند که در نهایت موجب افزایش معنی‌دار دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای شد. چنین اثرات منفی برای ذرات میکرو تنها در غلظت ۰/۹ میلی-مولار مشاهده شد. با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که اثرات فیتوتوکسینی نانو ذرات نسبت به ذرات میکرو در غلظت‌های پایین‌تر نمایان گردیده است.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، بیشترین کارایی مصرف

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

آب لحظه‌ای برگ‌های سیب زمینی در تیمار ۰/۳ میلی‌مولار ذرات نانو و میکرو بدست آمد. Romero-Aranda و همکاران (۲۰۰٦) نیز با افزودن سیلیسیم به محلول هوگلند، شاهد بهبود کارایی مصرف آب لحظه‌ای گیاه گوجه فرنگی بودند. همچنین یافته‌ها حاکی از تأثیر مثبت سیلیسیم بر کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ خیار در تنش کادمیوم (Feng *et al*., 2010) و *Spartina densiflor*a در تنش شوری (Mateos-Naranjo *et al*., 2013) بوده است. در پژوهش انجام گرفته توسط Haghighi and Pessarakli (۲۰۱۳) تیمارهای ۱ و ۲ میلی-مولار ذرات میکرو و نانو سیلیسیم در شرایط نرمال تأثیر مثبت و معنی‌داری بر کارایی مصرف آب برگ گوجه فرنگی داشتند و بیشترین تأثیر متعلق به نانو ذرات بود. اما در تحقیق حاضر علاوه بر عدم تفاوت آماری بین ذرات نانو و میکرو تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار، در غلظت‌های بالاتر ذرات نانو دارای اثرات منفی بوده و برتری با ذرات میکرو بود.

همبستگی مثبت و معنی‌داری بین کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ سیب زمینی با صفات کلروفیل a، b، کلروفیل کل، فتوسنتز و هدایت مزوفیلی برگ وجود داشت (جدول ۵). در مقابل، صفات هدایت روزنه‌ای برگ، تعرق و دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ همبستگی منفی با کارایی مصرف آب لحظه‌ای نشان دادند (جدول ۵). به طور کلی نتایج حاصل از مقایسه میانگین و همبستگی بین صفات نشان دهنده آن است که کابرد غلظت‌های مناسب سیلیسیم نانو و میکرو از طریق تأثیر مثبت بر رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب افزایش آسیمیلاسیون برگ شده و در نتیجه آن هدایت مزوفیلی برگ‌ها افزایش یافته است. همچنین غلظت مناسب سیلیسیم با کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق برگ نقش مهمی در بهبود روابط آبی گیاه و جلوگیری از اتلاف آب در گیاه شده و در نهایت مجموعه این عوامل باعث افزایش کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ در سیب زمینی شده است. در مقابل، در غلظت‌های بالاتر از حد بهینه ذرات سیلیسیم، تمامی عوامل تأثیر گذار بر کارایی آب لحظه‌ای برگ دچار نقصان شده و موجب افت این شاخص در سیب زمینی گردیده است.

نتیجه‌گیری کلی:

به طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که افزودن سیلیسیم تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار به محلول غذایی تأثیر مثبتی بر صفات مرتبط با رنگدانه‌ها و پارامترهای فتوسنتزی برگ گیاهچه‌های سیب زمینی رقم اگریا داشت. با افزایش غلظت از سطح یاد شده، تأثیر منفی سیلیسیم در غالب صفات مشاهده شد و در این بین، نانو ذرات در مقایسه با ذرات میکرو دارای اثرات منفی شدیدتری بر صفات مورد بررسی داشتند.

تشکر و قدردانی:

از حوزه معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی و معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تأمین اعتبار این تحقیق با کد ۳۷۹۳۹/۲ قدردانی می‌شود.

منابع:

سعادتیان، ب. و کافی، م. (۱۳۹٤) بررسی نقش تغذیه‌ای نانو ذرات سیلیسیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و تولید ریزغده سیب زمینی، نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی ۲۲: ۱۹۰-۱۷۳.

Adatia, M. H. and Besford, R. T. (1986) The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. Annual of Botany 58: 343-351

Ahmadi, A. and Siosemardeh, A. (2005) Investigation on the physiological basis of grain yield and drought resistance in wheat: leaf photosynthetic rate, stomatal conductance, and non-stomatal limitations. International Journal of Agricultural of Biology 7: 807-811.

Arnon, D. (1949) Copper enzyme polyphenoloxides in isolated chloroplast in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24: 1-15.

Asmar, A., Castro, E. M., Pasqual, M., Pereira, F. J. and Soares, J. D. R. (2013) Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. Scientia Horticulturae 161: 328-332.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

Currie, H. A. and Perry, C. C. (2007) Silica in plants: biological and biochemical and chemical studies. Annals of Botany 100: 1383-1389.

Dere, S., Gines, T. and Sivaci, R. (1998) Spectrophotometric determination of chlorophyll- a, b and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. Turkish Journal of Botany 22: 13-17.

Dietz, K. J. and Herth, S. (2011) Plant nanotoxicology. Trends in Plant Science 16: 582-589.

Epstein, E. (1999) Silicon, Annual Review. Plant Physiol and Plant Molecular Biology 50: 641-664.

Farran, I. and Mingo-Castel, A. M. (2006) Potato minituber production using aerophonics: effect of plant density and harvesting intervals. American Journal of Potato Research 83: 47-53.

Feng, J., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Yang, F. and Xu, H. (2010) Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. Scientia Horticulturae 123: 521–530.

Feng, J., Shi, Q. and Wang X. (2009) Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese. Agricultural Sciences in China 8(1): 40-50.

Haghighi, M. and Pessarakli, M. (2013) Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulturae 161: 111-117.

Kanwal, A., Ali, A. and Shoaib, K. (2006) In Vitro Microtuberization of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivar Kuroda- A New Variety in Pakistan. International Journal of Agriculture & Biology 8: 337-340.

Liang, Y., Shen, Q., Shen, Z. and Tongsheng, M. (1996) Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. Plant Nutrition 19:173-179.

Liang, Y. C. (1998) Effects of Si on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photo-synthetic activity in barley under salt stress. Pedosphere 8: 289-296.

Lichtenthaler, H. K and Wellburn, A. R. (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions 11: 591-592.

Ludish, H., Berk, A., Zipursky, S.L., Matsudaira, P., Baltimore, D. and Darnell, J. (2000) Molecular Cell Biology.New York. 16-37.

Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L. and Davy, A. J. (2013) Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. Plant Physiology and Biochemistry 63: 115-121.

Ozturk, G. and Yildirim, Z. (2010) A comparison of field performances of minitubers and micro tubers used in seed potato production. Turkish Journal of Field Crops 15: 141-147.

Parveen, N. and Ashraf, M. (2010) Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea Mays* L.) cultivars grown hydroponically. Pakestan Journal of Botany 42: 1675-1684.

Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herran, C., Relloso, J. and San Jose, M. (2001) Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. Potato Research, 44: 127-135

Romero-Aranda M. R, Jurado, O. and Cuartero, J. (2006) Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. Journal of Plant Physiology 163 847-855

Ruffini, C.M. and R. Cremonini. (2009) Nanoparticles and higher plants. Caryologia 62: 161-165.

Tuna A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A. R. (2008) Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental Experiment of Botany 62: 10-16.

Zuccarini. P. (2008) Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of Phaseolus vulgaris under NaCl stress. Biologia Plantarum 52: 157-160.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.6.8] [Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]