تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر رشد، عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک خیار گلخانه‌ای در سیستم آبکشت

رسول آذرمی[۱*]، سید جلال طباطبایی[۲] و نادر چاپارزاده[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۰۴)

چکیده

منیزیم نقش کلیدی در فتوسنتز، اختصاص کربوهیدرات‌ها، انتقال ساکارز در آوند آبکش، اکسایش نوری و کلروز برگ گیاهان ایفا می‌کند. به‌منظور ارزیابی تأثیر غلظت‌های مختلف منیزیم (صفر (شاهد)، ۲ و ۴ میلی‌مولار) و دمای محیط ریشه (۱۵، ۲۵ و ۳۵) بر رشد، عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک خیار گلخانه‌ای (رقم Nagen ۷۹۲)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال ۱۳۹۳ در سیستم آبکشت، اجرا گردید. نتایج نشان داد که تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری وزن تر و خشک برگ، تعداد برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل را کاهش داد؛ ولی، نسبت شاخساره به ریشه به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. در این شرایط، زمانی که تیمار شاهد در محلول غذایی همراه با دمای ۳۵°C در محیط ریشه استفاده گردید این اثرها شدیدتر بود. بیشترین عملکرد (۵۷۸ گرم در بوته) در تیمار ۴ میلی‌مولار منیزیم و دمای ۱۵°C مشاهده گردید. کمترین عملکرد (۲۷۶ گرم در بوته) در غلظت ۲ میلی‌مولار منیزیم و دمای محیط ریشه ۳۵°C به‌دست آمد. نسبت *Fv/Fm* با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی و با کاهش دمای محیط ریشه، افزایش یافت. با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، غلظت منیزیم و فسفر ریشه نیز افزایش یافت. غلظت فسفر برگ با افزایش دمای محیط ریشه افزایش یافت در حالی که غلظت فسفر ریشه با افزایش دمای محیط ریشه کاهش یافت. از نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، اثر نامطلوب دمای ۳۵°C محیط ریشه کاهش می‌یابد. بنابراین، غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی و دمای محیط ریشه ۱۵°C می‌تواند بهترین تیمار برای پرورش خیار گلخانه‌ای در فصل سرما پیشنهاد گردد.

کلمات کلیدی: سیستم هیدروپونیک، دمای بستر کشت، محلول غذایی، تنش گرمایی

مقدمه

اهمیت منیزیم در مقایسه با سایر عناصر معدنی در تولید محصولات کشاورزی در دهه‌های اخیر کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. بنابراین، به این عنصر، عنصر فراموش شده اطلاق می‌گردد (۷ و ۸). منیزیم یک عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاه بوده و بخشی از اجزای مولکول کلروفیل

۱. گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران
۳. گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r_azarmi@uma.ac.ir

می‌باشد. منیزیم نقش اساسی در فتوسنتز، انتقال مواد آسمیلاته، تجمع مواد کربوهیدراته، اکسیداسیون نوری و سیستم دفاعی گیاه دارد. در برگ‌های با کمبود منیزیم، کربوهیدرات‌های غیرساختمانی از قبیل قندها و نشاسته انباشته شده و نسبت وزن خشک شاخه به ریشه افزایش می‌یابد. تجمع کربوهیدرات‌ها در برگ‌های منبع در گیاهان با کمبود منیزیم باعث کاهش در مقدار کربوهیدرات در اندام‌های مقصد، مثل میوه و ریشه، می‌شود (۲). اختلال در رشد ریشه و کاهش حجم آن ممکن است تأثیر شگرفی بر جذب آب و عناصر معدنی به وسیله ریشه در شرایط کمبود آب و عناصر معدنی در خاک داشته باشد (۷ و ۱۲).

دمای خاک می‌تواند رشد گیاه را با تأثیر بر فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیک کل گیاه (از قبیل جذب عناصر معدنی) و خصوصیات خاک (از قبیل قابلیت دسترسی عناصر غذایی) به شدت تحت تأثیر قرار دهد. دمای خاک، قابلیت دسترسی عناصر معدنی خاک را از طریق تسریع در واکنش‌های شیمیایی و آزادسازی عناصر معدنی از مواد معدنی اولیه و محل تبادل ذرات رس و مواد آلی افزایش می‌دهد (۶ و ۲۳). دمای نسبتاً زیاد یا کم محیط ریشه، جذب منیزیم توسط گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما میزان تأثیر ممکن است بستگی به نوع و مرحله رشد گیاه داشته باشد. در تحقیقی، افزایش دمای ریشه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه سلسیوس) تجمع منیزیم را در دانهال‌های گندم ۳۰ روزه افزایش داد. اما تجمع منیزیم در این دانهال‌ها پس از ۳۰ روز کاهش یافت. زمانی که دمای محیط ریشه از ۲۰°C به ۱۰°C کاهش یافت، جذب منیزیم کمتر شد (۱۶). بنابراین، حفظ دمای محیط ریشه نزدیک به دمای هوا، مناسب‌ترین حالت برای تولید عملکرد بیشتر و کیفیت بهتر بخش خوراکی گیاه می‌باشد. بیشتر بودن دمای ریشه در مقایسه با دمای هوا به مدت طولانی، بر فعالیت ریشه و رشد گیاه تأثیر سوئی دارد (۲).

تأمین دمای بهینه محیط ریشه، به ویژه در سیستم آبکشت که در آن گرم کردن و خنک کردن بستر کشت به راحتی صورت می‌گیرد، از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه دمای کم محیط ریشه در فصول سرد سال و دمای زیاد محیط ریشه در فصل گرم سال از مهم‌ترین مشکلات کشت‌های گلخانه‌ای می‌باشد، بدین منظور، آزمایشی برای بررسی تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر رشد و عملکرد خیار گلخانه‌ای در سیستم آبکشت اجرا شد. این پژوهش برای اولین بار نه تنها در ایران، بلکه در دنیا، اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر رشد، عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک خیار گلخانه ای، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار روی رقم ناگن F1 ۷۹۲ در طول فصل زمستان سال ۱۳۹۲ و اوایل بهار سال ۱۳۹۳ اجرا گردید. فاکتور اول شامل غلظت منیزیم در محلول غذایی در سه سطح (صفر، ۲ و ۴ میلی‌مولار) و فاکتور دوم، دمای محیط ریشه در سه سطح (۱۵±۲، ۲۵ ±۲ و ۳۵ ±۲ درجه سلسیوس) بودند. تیمار منیزیم با استفاده از کود سولفات منیزیم ($MgSO_4.7H_2O$) تأمین گردید. در این آزمایش، برای اعمال تیمار دمایی ۱۵°C، دمای آب مخزن ۲۰۰ لیتری توسط دستگاه کمپرسور در دمای ۷°C تنظیم شده بود. آب سرد مخزن توسط پمپ و لوله‌های پلی‌اتیلن به لوله‌های گالوانیزه ۱۵ اینچ وارد می‌شد و بسترهای کشت با ابعاد ۱۵×۲۰×۷۰ سانتی‌متر، روی لوله‌های گالوانیزه قرار داده شده بودند. چرخش آب سرد در طول شبانه روز در لوله‌های گالوانیزه باعث سرد شدن بستر کشت و تنظیم دما روی ۱۵°C می‌گردید. کل این سیستم به‌صورت کامل با فوم عایق‌بندی شده بود تا دمای هوا بر دمای بستر کشت تأثیر نگذارد. به‌منظور اعمال تیمار دمایی ۲°C ± ۲۵، دمای آب مخزن در ۴۵°C تنظیم گردید. سپس، برای تنظیم دمای ۲۵°C، دو عدد لوله پلی اتیلن ۰/۵ اینچ از زیر بسترهای کشت عبور داده شدند. آب داغ مخزن از طریق این دو لوله به‌صورت سیستم بسته چرخش پیدا می‌کرد و باعث می‌شد که دما در بستر کشت روی ۲۵°C تنظیم گردد. نحوه تنظیم تیمار دمایی ۲°C ± ۳۵ ، همانند

جدول ۱. غلظت عناصر و نمک‌های استفاده شده در محلول غذایی هوگلند تغییر یافته

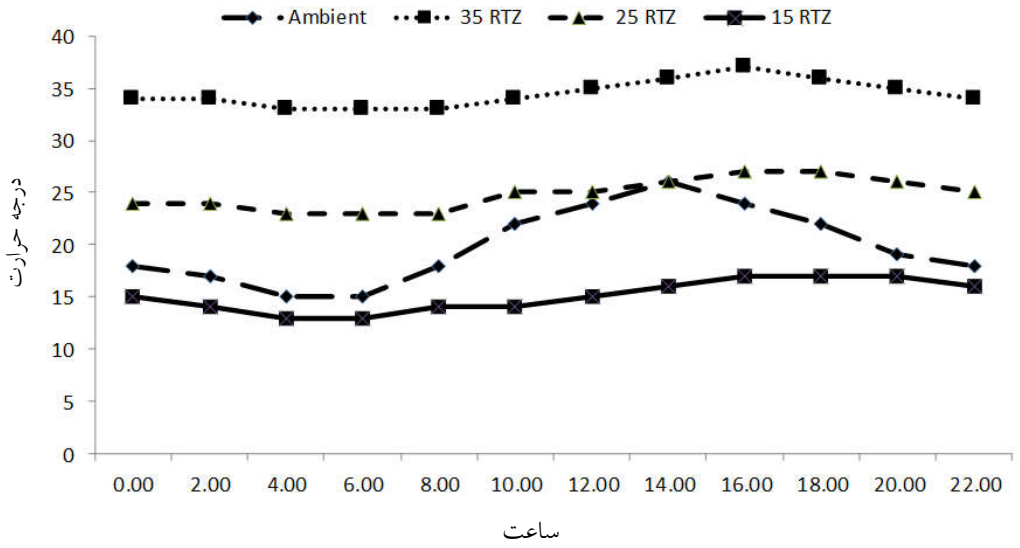
نوع نمک	غلظت (mg/L)	نوع نمک	غلظت (mg/L)
KH_2PO_4	P=۳۴/۸۸	$H_2MoO_4.H_2O$	Mo ۰/۰۳
KNO_3	K = ۲۱۹/۴	$MnSO_4.4H_2O$	Mn = ۰/۱
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	Ca = ۱۶۰	$ZnSO_4.7H_2O$	Zn = ۰/۱
Fe-EDDHA	Fe=۱۰	$CuSO_4.5H_2O$	Cu = ۰/۰۳
		H_3BO_3	B=۰/۳

تیمار ۲۵ºC بود؛ با این تفاوت که سه لوله پلی اتیلن ۰/۵ اینچ آب گرم از زیر بسترهای کشت عبور می‌کرد. برای کنترل دقیق دمای بسترها، در هر بستر کشت یک دماسنج دیجیتالی در محیط ریشه قرار داده شد. برای انجام آزمایش، بذر خیار گلخانه‌ای در سینی‌های کشت محتوی پرلایت کشت شده و با ظهور سومین برگ حقیقی، دانهال‌ها به بسترهای رشد حاوی پرلایت و کوکوپیت با نسبت ۱:۲ با حجم ۱۴ لیتر منتقل شدند. به‌طوری که در هر بستر کشت دو گیاه وجود داشت. گیاهان در طول دوره رشد با محلول غذایی هوگلند تغییر یافته که غلظت‌های آن در جدول (۱) آمده است آبیاری می‌شدند (۱۵). pH محلول غذایی با افزودن ۰/۰۲۵ میلی‌لیتر در لیتر اسید فسفریک و ۰/۰۶۲ میلی‌لیتر در لیتر اسید نیتریک، در محدوده ۶/۵ تنظیم شد. هدایت الکتریکی (EC) محلول‌های غذایی با آبشویی بستر کشت به‌صورت هفتگی در محدوده ۲/۲-۲ dS/m نگه داشته شد.

در پایان آزمایش، برای اندازه‌گیری وزن تر برگ و ریشه، بوته از طوقه قطع گردید و به قسمت‌های مختلف برگ و ریشه تقسیم شده و وزن تر آن یادداشت شد. وزن خشک هر اندام نیز پس از قرار دادن به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۸۰ºC در آون اندازه‌گیری شد. قبل از خشک کردن برگ‌ها در آون، سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (LI-COR, Model Li-1300, USA) به ثبت رسید. یک هفته قبل از برداشت گیاهان، شاخص کلروفیل با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD Minolta, Osaka, Japan) از برگ‌های توسعه یافته قرائت شد. همزمان با شاخص کلروفیل، حداکثر عملکرد فتوشیمیایی کوانتومی فتوسیستم II (*Fv/Fm*) با استفاده از دستگاه کلروفیل فلورسنس (Handy pea Fluorescence, Hansatech, UKChlorophyll) از برگ‌های توسعه یافته ثبت گردید. برای اندازه‌گیری منیزیم و فسفر برگ و ریشه، ابتدا نمونه‌های خشک شده در آون، آسیاب شده به‌صورت پودر همگن در آمد. سپس، نمونه‌های گیاهی همگن به روش اسید هضم شدند (۳). سپس، از عصاره حاصل برای اندازه‌گیری عناصر مورد نظر استفاده شد. غلظت منیزیم برگ به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer, Model 110, USA) در طول موج ۲۸۵/۲ اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر برگ و ریشه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۳۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. برای ارزیابی عملکرد، میوه‌ها دو بار در هفته برداشت شده و تعداد میوه و وزن آنها در هر بوته ثبت گردید. نسبت شاخساره به ریشه از نسبت وزن کل شاخه و برگ به وزن خشک ریشه به دست آمد. کلیه داده‌های حاصل از اندازه گیری‌ها توسط نرم‌افزار SPSS21 تجزیه آماری و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

شکل (۱) نشان می‌دهد که دمای هوا و محیط ریشه در طول شبانه روز تغییر پیدا کرد. میانگین دمای هوا در روز ۲۵ºC و در شب ۱۷ºC بود. تیمارهای دمای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس، در محیط ریشه در طول شبانه‌روز تقریباً ۲ºC(۲±۱۵، ۲±۲۵ و ۲±۳۵) نوسان داشت.



شکل ۱. دمای تیمارهای مختلف محیط ریشه و دمای هوا در طول شبانه روز

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تأثیر منیزیم، دمای محیط ریشه و برهم‌کنش آنها بر برخی صفات رویشی خیار

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر برگ	وزن خشک برگ	تعداد برگ	نسبت شاخه به ریشه
بلوک	۳	۶۰/۳۳	۱۷/۳۲	۰/۱۸۶	۰/۸۳۹
منیزیم	۲	۲۹۰۵/۸۶**	۱۵۰/۳۴**	۹/۳۶۱**	۰/۸۳۷*
دمای ریشه	۲	۲۱۶۰/۵۲**	۱۲۲/۰۷**	۲/۶۹۴*	۰/۸۱۸*
منیزیم*دمای ریشه	۴	۲۰۱/۷۷**	۱۳/۱۷**	۰/۵۶۹ ns	۰/۲۱ ns
خطا	۲۴	۴۵/۸۷	۳/۳۹	۰/۹۴۷	۰/۲۱۶
کل	۳۶				

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

وزن تر و خشک برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده و متقابل منیزیم و دمای محیط ریشه بر وزن تر و خشک برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). به طوری که با افزایش دمای محیط ریشه از ۱۵ºC به ۳۵ºC وزن تر و خشک برگ به طور معنی‌داری کاهش یافت. در حالی که در تیمار منیزیم، با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، وزن تر و خشک برگ افزایش یافت. بیشترین وزن تر و خشک برگ در گیاهان تغذیه شده با غلظت‌های ۲ و ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی و در دمای محیط ریشه ۱۵ ºC به دست آمد (جدول ۳).

تعداد برگ

جدول (۲) نشان می‌دهد که اثر ساده منیزیم و دمای محیط ریشه، تعداد برگ را به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. در حالی که اثر متقابل آنها معنی‌دار نبود. به‌طوری که گیاهان پرورش یافته در غلظت‌های ۲ و ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی، بیشترین تعداد برگ و در غلظت صفر منیزیم، کمترین تعداد برگ را تولید نمودند. همچنین، بیشترین تعداد برگ در دمای ناحیه ریشه و ۲۵ºC و کمترین تعداد برگ در دمای ۳۵ºC تولید گردید (جدول ۳). امیر شکاری و همکاران (۱) با بررسی سه سطح دمای محیط ریشه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه) در

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر منیزیم، دمای محیط ریشه و برهمکنش آنها بر برخی صفات رویشی خیار

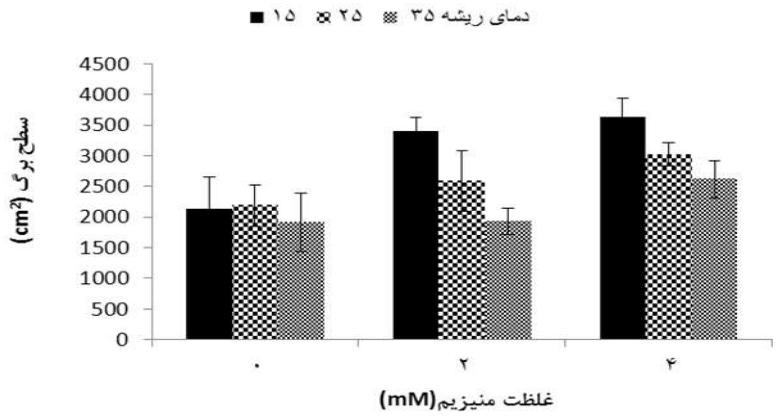
غلظت منیزیم (mM)	دمای ریشه (°C)	وزن تر برگ (گرم در گیاه)	وزن خشک برگ (گرم در گیاه)	تعداد برگ	نسبت شاخه به ریشه
	۱۵	۴۹/۵۰^{bc}	۱۲/۵۴^{cd}	۱۳/۵۰	۳/۳۸
۰	۲۵	۴۸/۷۵^{bc}	۱۲/۳۲^{cd}	۱۴/۵۰	۴/۳۴
	۳۵	۳۵/۰۰^{c}	۹/۵^{d}	۱۳/۲۵	۳/۸۰
	۱۵	۸۴/۲۵ ^{a}	۲۱/۰۸^{a}	۱۵/۰۰	۳/۴۰
۲	۲۵	۶۳/۲۵^{b}	۱۴/۹۷^{bc}	۱۵/۲۵	۳/۶۲
	۳۵	۴۳/۰۰^{c}	۱۲/۰۰^{cd}	۱۴/۲۵	۳/۱۳
	۱۵	۸۵/۵^{a}	۲۲/۴۲^{a}	۱۶/۰۰	۳/۲۶
۴	۲۵	۷۸/۵ ^{a}	۱۷/۲۸^{b}	۱۵/۵۰	۳/۵۴
	۳۵	۶۱/۷۵^{b}	۱۵/۵۵^{bc}	۱۵/۰۰	۳/۳۳
	۰	۴۴/۴۱^{c}	۱۱/۴۵^{c}	۱۳/۷۵^{b}	۳/۸۴^{a}
منیزیم	۲	۶۳/۵۰^{b}	۱۶/۰۲^{b}	۱۴/۸۳^{a}	۳/۳۸^{b}
	۴	۷۵/۲۵^{a}	۱۸/۴۲^{a}	۱۵/۵۰^{a}	۳/۳۸^{b}
	۱۵	۷۳/۰۸^{a}	۱۸/۶۸^{a}	۱۴/۸۳^{ab}	۳/۳۵^{b}
دمای ریشه	۲۵	۶۳/۵^{b}	۱۴/۸۶^{b}	۱۵/۰۸^{a}	۳/۸۳^{a}
	۳۵	۴۶/۵۸^{c}	۱۲/۳۵^{c}	۱۴/۱۶^{b}	۳/۴۲^{b}

میانگین‌های هر ستون که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند.

گیاه زعفران نشان دادند که دماهای ۱۵ و ۱۰ درجه، برای افزایش تعداد برگ‌ها در زعفران مناسب بودند. ولی برگ‌ها در دماهای ۱۵ و ۲۰ درجه رشد مناسب‌تری داشته‌اند و گیاهانی که در دماهای فوق رشد کرده بودند تعداد برگ بیشتری در مقایسه با گیاهان پرورش یافته در ۱۰°C تولید کردند.

نسبت شاخه به ریشه

جدول (۲) نشان می‌دهد که اثر ساده غلظت‌های مختلف منیزیم و دمای محیط ریشه، نسبت شاخه به ریشه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. به‌طوری که نسبت شاخه به ریشه در غلظت صفر منیزیم برابر با ۳/۸۴ و در غلظت‌های ۲ و ۴ میلی‌مولار برابر با ۳/۳۸ بود (جدول ۳). خیارهای رشد کرده در دماهای محیط ریشه ۱۵ و ۳۵ درجه کمترین نسبت شاخه به ریشه را تولید کردند. در صورتی که دمای محیط ریشه ۲۵°C بیشترین نسبت شاخه به ریشه را داشت. دمای کم در محیط ریشه معمولاً باعث کاهش نسبت شاخه به ریشه می‌شود. نسبت شاخه به ریشه در بیشتر تیمارهای تغذیه‌ای نیتروژن، فسفر و پتاسیم در دمای محیط ریشه ۱۰°C در مقایسه با ۲۰°C کمتر بود. نسبت شاخه به ریشه کمتر در دمای کم محیط ریشه به عنوان یک مکانیسم سازگاری برای جبران کاهش در شدت جذب عناصر معدنی در واحد ریشه می‌باشد (۱۰). نتایج این تحقیق همسو با یافته‌های کومبوس و نی (۹) بود که گزارش کردند رشد و توسعه ریشه شلغم در دمای بیشتر محیط ریشه محدود شده و باعث افزایش نسبت شاخه به ریشه می‌شود. افزایش نسبت شاخه به ریشه در دمای زیاد خاک ممکن است



شکل ۲. تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر سطح برگ

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس تأثیر منیزیم، دمای محیط ریشه و برهمکنش آنها بر برخی صفات خیار

غلظت منیزیم (mM)	دمای ریشه (°C)	کلروفیل	تعداد میوه	فسفر برگ	فسفر ریشه
بلوک	۳	۸/۵۴	۰/۱۷۶	۳۲/۲۸	۰/۱۲۳
منیزیم	۲	۲۰/۸۳**	۱۰/۱۹**	۰/۶۷۴ ns	۲/۸۲**
دمای ریشه	۲	۶۷/۵۱**	۲۶/۰۲**	۲۲/۰۸**	۱/۷۷**
منیزیم*دمای ریشه	۴	۳/۲۹*	۰/۴۰۳ ns	۲/۰۳ ns	۰/۲۰۶*
خطا	۲۴	۲۸/۷۱	۰/۴۰۵	۱/۳۶	۰/۰۸۲
کل	۳۶				

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

در ارتباط با جلوگیری از تشکیل و طویل شدن ریشه اصلی و اختصاص مواد خشک کمتر به ریشه باشد (۲۴).

سطح برگ

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی از صفر به ۴ میلی‌مولار منیزیم، سطح برگ از ۲۰۷۸/۵ سانتی‌متر مربع به ۳۰۹۳/۶ سانتی‌متر مربع افزایش یافت. اما با افزایش دمای محیط ریشه از ۱۵ °C به ۳۵ °C سطح برگ نیز از ۳۰۶۱/۹۱ سانتی‌متر مربع به ۲۱۵۱/۲۵ سانتی‌متر مربع کاهش یافت (شکل ۲). نتایج این تحقیق همسو با نتایج هی و همکاران (۱۴) بود که گزارش کردند انبساط و آغازش برگ، وزن تر و خشک شاخساره و ریشه را در دمای زیاد محیط ریشه کاهش میدهد **به** انبساط و آغازش برگ، وزن تر و خشک شاخساره و ریشه، در دمای بالای محیط ریشه کاهش می‌یابد این امر همچنین نشان می‌دهد که دمای محیط ریشه تأثیر مهمی روی رشد شاخساره و ریشه دارد. محیط ریشه گرم باعث کاهش میزان انبساط برگ می‌شود. در حالی که محیط ریشه خنک میزان این انبساط را افزایش می‌دهد.

شاخص کلروفیل

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که غلظت کلروفیل برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده و متقابل منیزیم و دمای محیط ریشه قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی و با کاهش دمای محیط ریشه از ۳۵°C به ۱۵°C غلظت کلروفیل

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر منیزیم، دمای محیط ریشه و برهم‌کنش آنها بر غلظت عناصر معدنی در خیار

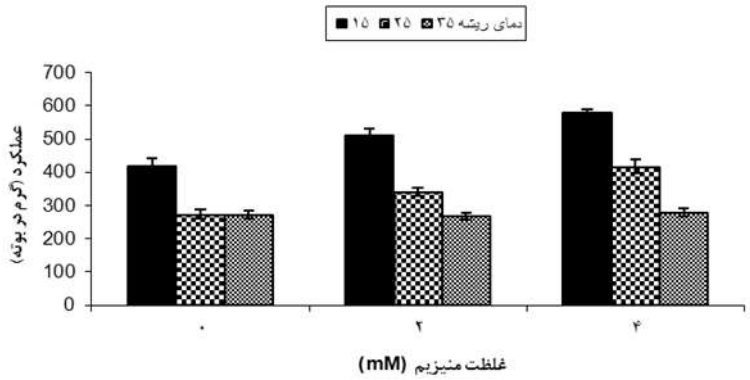
غلظت منیزیم (mM)	دمای ریشه (°C)	تعداد میوه	کلروفیل SPAD UNIT	فسفر برگ (mg/g DW)	فسفر ریشه (mg/g DW)
۰	۱۵	۶/۰۰ b	۳۶/۹۷bc	۵/۶۲	۲/۰۷b
	۲۵	۴/۰۰ c	۳۵/۳۲c	۶/۳۸	۱/۲۴c
	۳۵	۴/۰۰ c	۳۴/۰۲d	۸/۲۴	۱/۲۲c
۲	۱۵	۷/۰۰ a	۳۹/۹۲a	۵/۷۴	۲/۲۸ab
	۲۵	۵/۰۰bc	۳۶/۵۷bc	۸/۰۷	۲/۰۷b
	۳۵	۴/۰۰ c	۳۵/۲۲c	۷/۸۵	۱/۴۷c
۴	۱۵	۸/۰۰ a	۴۱/ ۴۰a	۵/۵۶	۲/۷۰a
	۲۵	۵/۷۵ b	۳۷/۶۷b	۶/۵۷	۲/۶۹a
	۳۵	۵/۰۰ c	۳۴/۹۵ c	۸/۹۷	۲/۰۵b
منیزیم	۰	۴/۶۶ c	۳۵/۴۴b	۶/۷۵	۱/۵۱c
	۲	۵/۷۵ b	۳۷/۲۴a	۷/۲۲	۱/۹۴b
	۴	۶/۵۰a	۳۸/۰۰a	۷/۰۳	۲/۴۸a
دمای ریشه	۱۵	۷/۳۳ a	۳۹/۴۳a	۵/۶۴c	۲/۳۵ a
	۲۵	۴/۹۱ b	۳۶/۵۲b	۷/۰۱b	۲/۰۰b
	۳۵	۴/۶۶ c	۳۴/۷۳c	۸/۳۵a	۱/۵۸c

میانگین‌های هر ستون در هر تیمار که حداقل یک حرف مشترک دارند، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند.

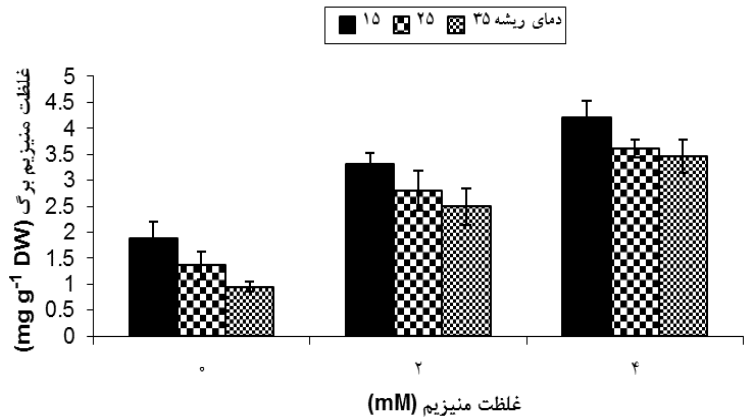
افزایش یافت (جدول ۵). تأثیر دما بر تشکیل کلروفیل توسط مکانیزم‌های مختلفی اعمال می‌شود. در دمای بهینه، سنتز متابولیت‌ها از قبیل قندها ممکن است افزایش یابد. بنابراین، باعث افزایش غلظت کلروفیل در برگ‌ها می‌شود (۴). همچنین، منیزیم هم از اجزای ساختمانی مولکول کلروفیل بوده و هم در سنتز کلروفیل نقش دارد. به‌طوری که با افزایش غلظت منیزیم، غلظت کلروفیل نیز افزایش پیدا می‌کند (۲۰ و ۲۲).

عملکرد

تعداد میوه و عملکرد به طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده و متقابل غلظت‌های مختلف منیزیم و دمای محیط ریشه قرار گرفت (جدول ۴). روند تغییرات تعداد میوه مشابه عملکرد بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد در دمای ۱۵ºC و در غلظت‌های ۴ و ۲ میلی‌مولار منیزیم و کمترین آن در غلظت‌های مختلف منیزیم در دمای محیط ریشه ۳۵ºC به دست آمد (شکل ۳). مون و همکاران (۲۱) با بررسی تأثیر خنک‌سازی ناحیه ریشه بر رشد و عملکرد خیار نشان دادند که زمانی که میانگین دما در محیط ریشه خنک نشده ۳۰/۹ و ۲۶/۹ درجه و دمای محیط ریشه خنک شده ۲۴/۳ و ۲۰/۶ درجه باشد، عملکرد در ناحیه ریشه خنک نشده کاهش سریع‌تری نسبت به ناحیه ریشه خنک شده داشت و تعداد میوه‌های هر بوته در محیط ریشه خنک نشده ۱۵/۹ و در محیط ریشه خنک شده ۱۹/۳ بود. بنابراین، خنک‌سازی ناحیه ریشه باعث افزایش عملکرد خیار در شرایط دمای زیاد هوا می‌شود. افزایش عملکرد ناشی از افزایش در وزن و تعداد میوه بود. دمای بیش از ۳۴ºC منجر به کاهش سنتز کلروفیل، فتوسنتز و تنفس شده، و در



شکل ۳. تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر عملکرد میوه



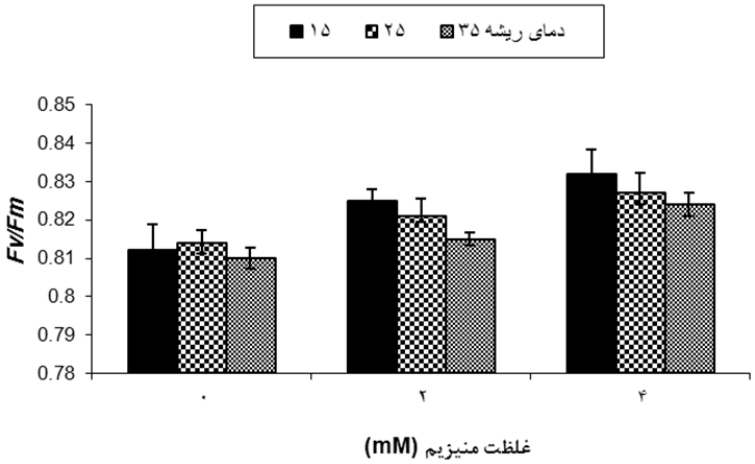
شکل ۴. تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر غلظت منیزیم برگ

نهایت منجر به کاهش رشد و عملکرد می‌شود (۱۱). افزایش عملکرد در دمای ۱۵ºC ممکن است ناشی از کلروفیل بیشتر، سطح برگ بزرگ‌تر، وزن بوته زیادتر، غلظت منیزیم و فسفر بیشتر باشد.

غلظت منیزیم برگ

نتایج نشان داد که غلظت منیزیم برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده و متقابل منیزیم و دمای محیط ریشه قرار گرفت. بدین صورت که به موازات افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، غلظت منیزیم برگ نیز افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۱۵ºC به ۳۵ºC، غلظت منیزیم برگ از ۳/۱ میلی‌گرم در گرم به ۲/۳ میلی‌گرم در گرم کاهش یافت. در حالی که با افزایش غلظت منیزیم از صفر به ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی، غلظت منیزیم برگ از ۱/۴ به ۳/۷۶ میلی‌گرم در گرم افزایش نشان داد (شکل ۴).

مشاهدات حاصل از این آزمایش نشان داد که علائم کمبود منیزیم روی برگ‌ها در غلظت صفر میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی مشاهده شد و علائم کمبود به‌صورت زرد شدن بین رگ‌برگ‌های برگ‌های میانی روی ساقه ظاهر گردید. همچنین، نتایج آزمایش نشان داد که بیشترین رشد و عملکرد خیار در غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی به‌دست آمد و از آنجایی که در تهیه محلول غذایی، عمدتاً از فرمولاسیون هوگلند استفاده می‌شود و در این فرمولاسیون از غلظت ۲ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی استفاده می‌شود (۱۵)، منیزیم به عنوان یک کاتیون رقابت کننده ضعیف می‌باشد، که در صورت افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی اثر رقابتی کمتری روی جذب کلسیم و پتاسیم می‌گذارد (۶). نتایج این آزمایش پیشنهاد می‌کند که غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی برای رشد و عملکرد بهتر خیار گلخانه‌ای در سیستم آبکشت مطلوب می‌باشد.



شکل ۵. تأثیر منیزیم و دمای محیط ریشه بر *Fv/Fm* برگ

دمای نسبتاً زیاد یا کم محیط ریشه، جذب منیزیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و شدت تأثیر دما براساس گونه گیاه و مرحله رشدی گیاه متفاوت می‌باشد. بارکر و پیلبیم (۶) گزارش کردند که افزایش دمای محیط ریشه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه)، تجمع منیزیم را در دانهال‌های گندم ۳۰ روزه افزایش داد. در صورتی که در دانهال‌های بیشتر از ۳۰ روز تجمع منیزیم کاهش یافت.

غلظت فسفر برگ و ریشه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده دمای محیط ریشه بر فسفر برگ معنی‌دار بود. در صورتی که فسفر ریشه از نظر آماری تحت تأثیر اثر ساده و متقابل منیزیم و دمای محیط ریشه قرار گرفت (جدول ۴). بدین ترتیب که با افزایش دمای محیط ریشه، غلظت فسفر برگ افزایش یافت و بیشترین غلظت فسفر برگ در دمای ۳۵ºC مشاهده شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، غلظت فسفر ریشه به طور معنی‌داری افزایش یافت. ولی با افزایش دمای محیط ریشه، غلظت فسفر ریشه کاهش نشان داد. بیشترین غلظت فسفر ریشه در غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم و در دماهای ۲۵ و ۱۵ به‌دست آمد. کمترین آن در غلظت صفر منیزیم و دمای ۳۵ درجه ثبت گردید (جدول ۵). جذب فسفر معمولاً با دمای محیط ریشه رابطه دارد (۱۸). در گوجه‌فرنگی، زمانی که دمای خاک از ۱۳/۳ به ۱۵/۵ºC افزایش یافت، افزایش محسوسی در غلظت فسفر برگ‌ها مشاهده شد. منیزیم اثر هم‌افزایی بر تجمع فسفر در گیاهان دارد. این پدیده ممکن است به علت ایجاد تعادل یونی با جذب کاتیون‌ها و آنیون‌ها به درون گیاهان و رشد بیشتر ریشه باشد (۵). لاسا و همکاران (۱۹) گزارش کردند که در گل آفتابگردان (*Helianthus annuus*) پرورش یافته در سیستم آبکشت، با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی از صفر به ۲۴۰ میلی‌گرم در لیتر، فسفر در بافت‌ها از ۹ به ۱۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک گیاه افزایش یافت.

کارایی حداکثر فتوشیمیایی فتوسیستم II (*Fv/Fm*)

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین نسبت *Fv/Fm* در غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم و در دمای محیط ریشه ۱۵ºC و ۲۵ºC به ثبت رسید. در حالی که کمترین نسبت *Fv/Fm* در تیمار صفر منیزیم و در هر سه تیمار دمای محیط ریشه (۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سلسیوس) به‌دست آمد (شکل ۵). نتایج این تحقیق همسو با نتایج جی و کونگ (۱۷) بود که گزارش کردند در فصول سرد، نسبت *Fv/Fm* در دمای محیط ریشه ۲۰ºC در مقایسه با دمای محیط ریشه ۳۰ºC بیشتر بود. کاهش نسبت *Fv/Fm* در برگ‌های با کمبود منیزیم ممکن است در ارتباط با تراکم جریان فوتون فتوسنتزی (Photon Flux Density, PPFD Photosynthetic)

زیاد و نسبت بالایی از مراکز واکنش سیستم نوری II مختل شده در برگ‌های با کمبود منیزیم باشد (۱۳).

نتیجه‌گیری

از نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی، اثرهای نامطلوب دمای محیط ریشه ۳۵°C کاهش می‌یابد. بنابراین، غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم در محلول غذایی و دمای محیط ریشه ۱۵ درجه سلسیوس می‌تواند بهترین تیمار برای پرورش خیار گلخانه‌ای در فصل سرما باشد.

منابع مورد استفاده

۱. امیر شکاری، ح.، ع. سروش زاده، س. ع. م. مدرس ثانوی و م. جلالی جواران. ۱۳۸۶. تأثیر دمای محیط ریشه، اندازه پیاز و جیبرلین بر رشد رویشی زعفران زراعی (*Crocus sativus* L.). زیست شناسی ایران ۱۹(۱): ۵– ۱۸.

۲. رونقی، ع و م. مفتون. ۱۳۸۲. هیدروپونیک (آبکشتی) راهنمای عملی برای پرورش دهندگان کشت بدون خاک. (ترجمه). انتشارات دانشگاه شیراز.

۳. طباطبایی، س. ج. ۱۳۹۲. اصول تغذیه معدنی گیاهان (مفاهیم نظری و عملی). انتشارات دانشگاه تبریز، ۵۴۴ صفحه.

4. Al-Hamdani, S.H. and J.J. Ghazal. 2009. Selected physiological responses of *Salvinia minima* to various temperatures and light intensities. Am. Fern J. 99: 155-161.
5. Aoalsteinsson, S. and P. Jensen. 2006. Influence of temperature on root development and phosphate influx in winter wheat grown at different P levels. Physiol. Plant. 80: 69-74.
6. Barker, A. and D.J. Pilbeam. 2007. Handbook of Plant Nutrition. CRC Press, Taylor and Francis.
7. Cakmak, I. and E.A. Kirkby. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. Physiol. Plant. 133: 692-704.
8. Cakmak, I. and H. Marschner. 1992. Magnesium- deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. Plant Physiol. 98: 1222-1227.
9. Cumbus, I.P. and P.H. Nye. 1982. Root zone temperature effects on growth and nitrate absorption in rape *(Brassica napus* cv. Emerald). J. Exp. Bot. 137: 1138-1146.
10. Daskalaki, A. and S.W. Burrage. 1998. Solution temperature and uptake of water and nutrients by cucumber (*Cucumis sativus* L.) in hydroponics. Acta Hort. 458: 317-322.
11. Dodd, I.C., J. He, C. G. N. Turnbull, S. K. Lee and C. Critchley. 2000. The influence of supra-optimal root zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L. J. Exp. Bot. 343: 239-248.
12. Economaksi, C.D. 2008. Effect of root zone temperature on growth and water uptake by lettuce plants in solution culture. Acta Hort. 449.
13. Hariadi, Y. and S. Shabala. 2004. Screening broad beans (*Vicia faba*) for magnesium deficiency. Ll. Photosynthetic performance and leaf bioelectrical responses. Func. Plant Biol. 31: 539-549.
14. He, J., L.P. Tan and S.K. Lee. 2009. Root-zone temperature effects on photosynthesis, 14C-photoassimilate partitioning and growth of temperate lettuce (*Lactuca sativa* cv. 'Panama') in the tropics. Photosynthetica 47(1): 95-103.
15. Hoagland, D.R. and D.S. Arnon. 1950. The water culture method for growing plants without soil. Calif. Agric. Exp. Sta. Circ. 374: 1-32.
16. Jensen, P. and J. Perby. 1986. Growth and accumulation of N, K, Ca^{+2}, and Mg^{+2} in barley exposed to various nutrient regimes and root/shoot temperatures. Physiol. Plant. 67:159-165.
17. Jie, H. and L.S. Kong. 1998. Growth and photosynthetic characteristics of lettuce *(Lactuca sativa* L.) under fluctuating hot ambient temperatures with the manipulation of cool root-zone temperature. Plant Physiol. 152*:* 387-391.
18. Kosobrukhov, A.A., E.A. Bagnavets, N.A. Semenova and L.N. Chermnykh. 1988. Photosynthesis and absorption of mineral nutrient in tomato plants under various root zone temperature and light conditions. Biotronics 17: 21-28.
19. Lasa, B., S.M. Frechilla, B. Aleu, C. Gonzalez-Moro, P.M. Lamsfus and P.M. Aparicio-Tejo. 2000. Effects of low and high levels of magnesium on the response of sunflower plants grown with ammonium and nitrate. Plant Soil 225: 167-174.
20. Marschner, P. 2012. Marschner Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Ed., Elesevier Ltd.

21. Moon, J.H., Y.K. Kang and H.D. Suh. 2008. Effect of root-zone cooling on the growth and yield of cucumber at supra optimal air temperature. Acta Hort. 761.
22. Pierre, H. and F. Urs. 2005. Growth at moderately elevated temperature alters the physiological response of the photosynthetic apparatus to heat stress in pea (*Pisum sativum*) leaves. Plant Cell Environ. 28: 302-317.
23. Qiuyan, Y., D. Zengqiang, M. Jingdong, L. Xun and D. Fei. 2012. Effects of root-zone temperature and N, P, and K supplies on nutria uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics. Soil Sci. Plant Nutr. 58: 707-717.
24. Sattelmacher, B., H. Marschner and R. Kuhne. 1990. Effects of the temperature of the rooting zone on the growth and development of roots of potato (*Solanum tuberosum*). Ann. Bot. 65: 27-36.