اثرات سمیت گاز دی‌اکسید گوگرد بر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در گیاه داودی تحت شدت‌های مختلف نور

فرداد دیداران[۱]، ساسان علی نیایی فرد*[۲]، مصطفی عرب[۲]، محمود رضا روزبان[۲] محبوبه زارع مهرجردی[۲]
[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران
*[۲] گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران
*نویسنده مسئول: aliniaeifard@ut.ac.ir

چکیده

یکی از مهم‌ترین و خطرناکترین آلاینده‌های گازی، دی‌اکسید گوگرد می‌باشدکه تجمع آن در غلظت‌های بالا باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیای در گیاهان می‌شود. علاوه براین نور مهمترین پارامتر محیطی است که شدت آن باعث تغییر در فرآیندهای فیزیولوژیک و فتوسنتزی گیاه می‌شود. به منظور بررسی اثرات شدت‌های نور و غلظت دی‌اکسید گوگرد بر کارایی فتوشیمیایی گیاه داودی پژوهشی انجام شد که در آن از سه شدت نور صفر، ۳۰۰ و ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه و دو غلظت صفر و ۲۰ ppm گاز دی‌اکسید گوگرد به مدت ۶ ساعت استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که مقادیر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m)، میزان جذب نور به ازای هر مرکز واکنش (ABS/RC)، میزان به دام انداختن الکترون به ازای هر مرکز واکنش (TR_o/RC)، انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET_o/RC)، انرژی اتلاف شده به ازای هر مرکز واکنش(Di_o/RC) و شاخص عملکرد جذب فوتون (PIABS) در تیمار دی‌اکسید گوگرد، نور و اثرات متقابل آن‌ها دارای تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بودند. دی‌اکسید گوگرد در شدت‌های بالای نور باعث تخریب سیستم فتوسنتزی گیاه و زنجیره‌ی انتقال الکترون شد و از این طریق کارایی فتوسنتز را تقلیل داد.

کلمات کلیدی: آلاینده‌های گازی، داودی، زنجیره انتقال الکترون فتوسیستم II، نور

مقدمه

یکی از پیامدهای انقلاب صنعتی افزایش روزافزون استفاده از فرآورده‌های نفتی می‌باشد. کاربرد شایع فرآورده‌های نفتی به عنوان منبع انرژی منجر به نشر حجم زیادی از آلاینده‌های گازی به اتمسفر می‌شود. در بین آلاینده اتمسفر، دی‌اکسید گوگرد یکی از مهم‌ترین و مضرترین آلاینده‌های جوی می‌باشد. میزان سمیت این گاز بسته به غلظت و مدت زمان قرار گرفتن در معرض آن متفاوت است.

با سرد شدن هوا و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی در گلخانه‌ها غلظت آلاینده‌های گازی به خصوص دی‌اکسید گوگرد افزایش می‌یابد؛ که به طور مستقیم بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر می‌گذارد (Lee *et al.*, 2017). جذب و تجمع آلاینده‌های هوا توسط گیاهان سبب ایجاد تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیای در آنها می‌شود (Dhir, 2016) که در نهایت منجر به آسیب برگ و روزنه‌ها، پیری زودرس، کاهش فعالیت فتوسنتزی، کاهش نفوذ پذیری غشاء و کاهش رشد و عملکرد در گیاهان می‌شود. قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بالای دی‌اکسید گوگرد سبب ایجاد تغییرات فیزیولوژیک، مورفولوژیک و بیوشیمیایی در گیاهان شده و رشد و عملکرد آنها را کاهش می‌دهد. فتوسنتز مهم‌ترین فرآیند گیاهی می‌باشد که شدیداً تحت تأثیر SO_2 قرار می‌گیرد (Chauhan and Joshi, 2010).

نور به عنوان منبع اولیه انرژی، یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی برای رشد گیاه است که شدت و کیفیت آن بر خصوصیات رشدی، مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه تأثیر می‌گذارد. ارتباط بین نرخ فتوسنتز و شدت نور مستقیم است که این ارتباط برای هر گیاه آستانه مشخصی دارد. شدت نور بر هدایت روزنه‌ای در گیاه تأثیرگذار بوده و شدت‌های نوری مختلف تبادلات گازی گیاه را دستخوش تغییر قرار می‌دهند (Zhang *et al.*, 2003).

IrHC2019

تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با برهمکنش گاز دی‌اکسید گوگرد و شدت‌های مختلف نور بر گیاه صورت نگرفته است اما گزارش‌های زیادی در زمینه‌ی اثرات هر یک از این دو عامل بر صفات فیزیولوژیک، فتوسنتزی و بیوشیمی گیاهان وجود دارد که به کلیدی‌ترین آنها اشاره خواهد شد.

در پژوهشی با عنوان واکنش روزنه‌ای در حضور دی‌اکسید گوگرد، بیان شد که این گاز یک آلاینده مهم می‌باشد که باعث آسیب به گیاه شده و H_2SO_3 مشتق شده از آن منجر به القای بسته شدن روزنه در طی مرگ سلولی برنامه‌ریزی شده (PCD) در سلول‌های نگهبان می‌شود (Ooi *et al.*, 2018).

بررسی‌های انجام شده در گیاه انار تحت غلظت‌های مختلف دی‌اکسید گوگرد نشان داد که تعداد برگ، سطح برگ، وزن تر، وزن خشک و کلروفیل گیاه تحت تاثیر این گاز قرار داشتند. نرخ فتوسنتز و در پی آن سطح تولید کربوهیدرات با افزایش غلظت گاز به طور کاملا معنی‌دار کاهش یافت؛ این کاهش سرعت رشد و میزان وزن تر و خشک گیاه را متاثر کرد (Swain and Padhi 2015).

بررسی اثر شدت‌های مختلف نور بر خصوصیات فلورسنس کلروفیل و میزان تولید در کاهو نشان داد که در شدت‌های ۲۰۰ تا ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه بیشترین کارایی استفاده از نور به دست آمد که منجر به افزایش نرخ فتوسنتز و در نتیجه عملکرد بالای محصول گردید. این در حالی بود که شدت نور ۸۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه منجر به کاهش نرخ فتوسنتز و در نهایت عملکرد گیاه شد (Fu, Li *et al.*, 2012).

ارزیابی تأثیرات SO_2 در شدت‌های مختلف نور بر واکنش‌های گیاهی از اهداف پژوهش حاضر است که در گیاه داودی به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان زینتی مورد بررسی قرار می گیرد.

موادوروش‌ها

مواد گیاهی

قلمه‌های تازه ریشه‌دار شده رقم Zembela lime گل داودی شاخه بریده (*Chrysanthemum morifolium*cv.Zembela lime)در بستری از کوکوپیت و پرلیت (به نسبت حجمی ۱:۱)با دمای روزانه ۲۴ و شبانه ۱۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصدکشت شدند. از برگ‌های بالغ و جوان توسعه یافته جهت انجام آزمایش استفاده گردید.

اعمال تیمارها

تیمارهای نوری شامل شدت‌های صفر، ۳۰۰ و ۶۰۰ میکرومولبر متر مربع در ثانیه نور سفید (۴۰۰-۷۰۰ nm) بودند که با استفاده از ماژول‌های LED (ایران گرولایت) تأمین شدند. جهت تأیید و تعیین شدت و طول موج از دستگاه اسپکتروفوتومستر (Sekonic C-7000) استفاده گردید. به منظور محاسبه غلظت تیمار گازی از روش واندروالس با فرض ایده‌آل بودن گاز در دما و فشار ثابت استفاده شد. گاز مورد نیاز از طریق کپسول گاز SO_2 با درصد خلوص ۹۹/۹۹ درصد مجهز به رگلاتور، به داخل محفظه عایق به تبادلات گازی در حجم ۲ لیتر تزریق گردید. برگ گیاهان به مدت ۶ ساعت در محفظه قرار گرفتند و پس از آن بررسی‌ها انجام شد.

تست OJIP

تست OJIP با استفاده از دستگاه PAR-fluorPen FP 100-MAX در برگ‌های جوان توسعه یافته که حداقل ۲۰ دقیقه در تاریکی سازگار شده‌اند انجام گرفت. پس از سازگاری در تاریکی، F_0 در زمان ۵۰µs، شدت فلئورسنس در ۲ms(مرحلهJ)، ۶۰ms (مرحله I) و ۳۰۰ms (مرحلهP) اندازه‌گیری شد. در نهایت محاسبات با استفاده از نرم افزارPAR-Fluorpen نسخه ۱ انجام گرفت (Kalhor, Aliniaeifard *et al.*, 2018)(جدول ۱).

IrHC2019

جدول ۱ : شاخصه‌های محاسباتی برای زنجیره انتقال الکترون.

اسم	رابطه
حداقل فلورسانس وقتی تمام مراکز واکنش فتوسیستم دو، باز هستند	$F_o= F_{50\mu s}$
فلورسانس در زمان ۲ میلی ثانیه	$F_J= F_{2m}$
فلورسانس در زمان ۶۰ میلی ثانیه	$F_I= F_{60ms}$
حداکثر فلورسانس وقتی تمام مراکز واکنش فتوسیستم دو، بسته هستند	$F_m= F_{1s}$
شدت فلورسانس متغیر	$F_V= F_m- F_o$
فلورسانس متغیر نسبی در مرحله حد واسط J	$V_J= (F_J-F_o)/(F_m-F_o)$
فلورسانس متغیر نسبی در مرحله حد واسط I	$V_I= (F_I-F_o)/(F_m-F_o)$
حداکثر کارایی فتوسیستم دو	$\Phi_{Po}= 1- (F_o/F_m)$ یا F_V/F_m
احتمال انتقال الکترون برانگیخته شده به آنسوی کوئینون A	$\Psi_o= 1- V_I$
عملکرد کوانتومی انتقال الکترون	$\Phi_{Eo}= (1-(F_o/F_m)).\ \Psi_o$
عملکرد کوانتومی اتلاف انرژی	$\Phi_{Do}= 1- \varphi P_o- (F_o/F_m)$
میزان جذب نور به ازای هر مرکز واکنش	$ABS/RC= M_o.(1/V_J).(1/\varphi P_o)$
میزان به دام انداختن الکترون به ازای هر مرکز واکنش	$TR_o/RC= M_o.(1/V_J)$
انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش	$ET_o/RC= M_o.\ (1/V_J).\Psi_o$
انرژی اتلاف شده به ازای هر مرکز واکنش	$Di_o/RC= (ABS/RC)-(TR_o/RC)$

نتایج وبحث

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش اثرات شدت نور و غلظت‌های دی‌اکسید گوگرد بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ در مقدار عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m)، میزان جذب نور به ازای هر مرکز واکنش (ABS/RC)، میزان به دام انداختن الکترون به ازای هر مرکز واکنش (TR_o/RC)، انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET_o/RC)، انرژی اتلاف شده به ازای هر مرکز واکنش(Di_o/RC) و شاخص عملکرد جذب فوتون (PIABS) در تیمار دی‌اکسید گوگرد، نور و اثرات متقابل آن‌ها بود. در شاخص PI_{ABS} اثرات متقابل نور و دی‌اکسید گوگرد در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار نشان دادند (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس داده‌های

منابع تغییرات	درجه زادی	F_v/F_m	ABS/RC	TR_0/RC	ET_0/RC	DI_0/RC	PI_{ABS}
نور	۲	۰/۲۴**	۵/۲۴**	۱/۷۶**	۰/۸۷**	۰/۵**	۲/۴۴**
خطای a	۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۴
SO_2	۱	۱/۳۹**	۱۶/۶۰**	۸/۷**	۳/۱۵**	۰/۴۰**	۱۲/۳۱**
نور * SO_2	۲	۰/۲۰**	۵/۹۹**	۱/۷۷**	۱/۲۵**	۰/۷۶**	۰/۴۰*
خطای b	۴	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۱

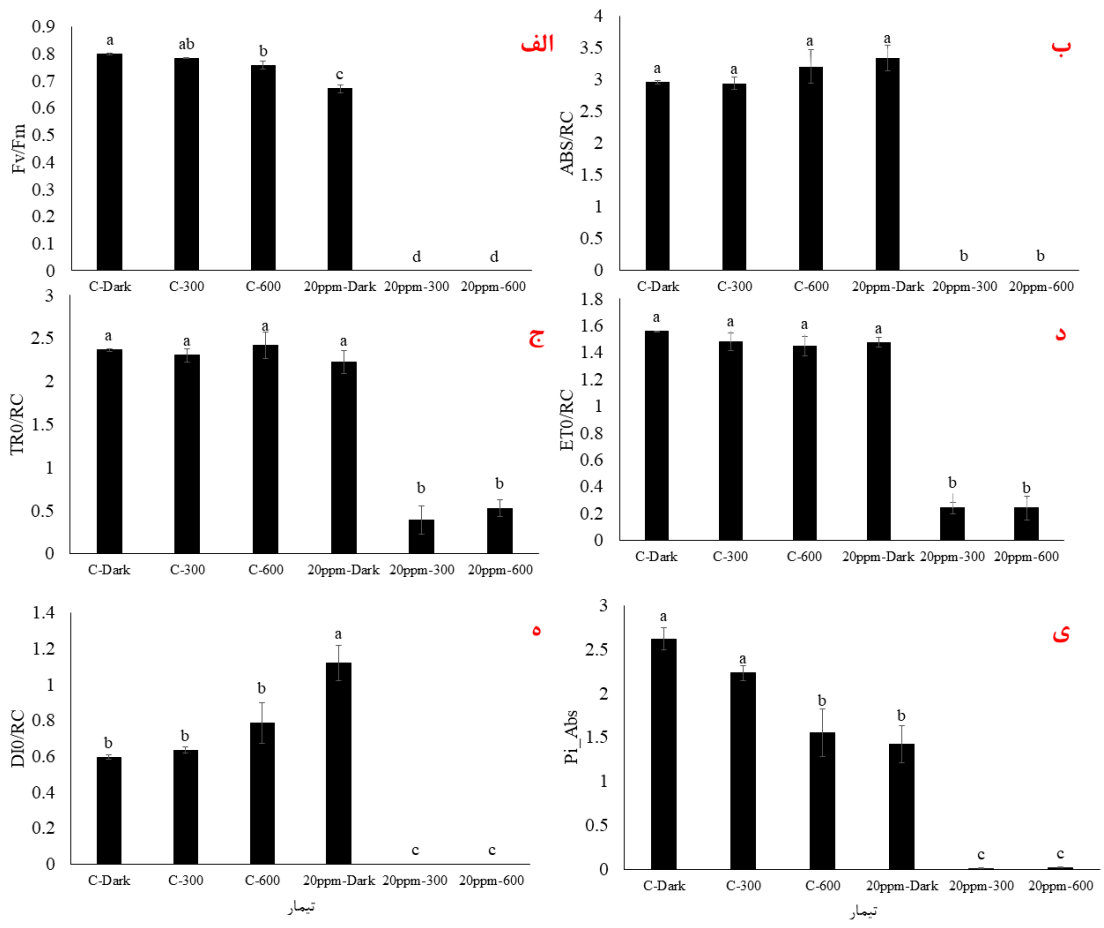
بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها میزان F_v/F_m در پی تیمار با دی‌اکسید گوگرد در تمامی تیمارهای نوری کاهش یافت که این کاهش در شدت‌های نوری ۳۰۰ و ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه چشمگیر بود. بیش ترین مقدار F_v/F_m در شرایطی مشاهده گردید که از دی‌اکسید گوگرد استفاده نشده بود و برگ ها در تاریکی و یا شدت نور ۳۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه قرار داشتند. افزایش شدت نور به ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه منجر به کاهش F_v/F_m گردید (شکل ۱ قسمت الف).

IrHC2019

نتایج مقایسات میانگین داده‌های ABS/RC، TR_0/RC، ET_0/RC نشان داد که وجود نور در تیمار دی‌اکسید گوگرد منجر به کاهش قابل توجهی در مقادیر این شاخص‌ها گردید که چنین پاسخی در شرایطی که از دی اکسید گوگرد استفاده نشده بود مشاهده نشد (شکل ۱ قسمتهای ب-د).

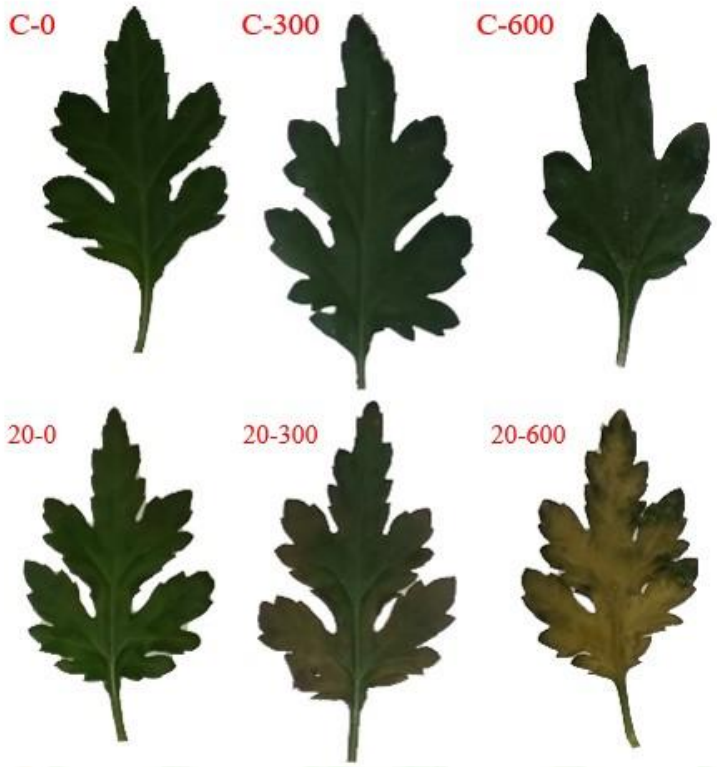
طبق نتایج به دست آمده از مقایسات میانگین داده‌ها بیشترین مقدارDI_0/RC در تیمار دی‌اکسید گوگرد و تاریکی مشاهده شد و با توجه به این که مرکز واکنش نمونه‌های دی‌اکسید گوگرد در حضور نور به طور کامل از بین رفته بود، واکنشی نشان ندادند. انرژی اتلاف شده به ازای هر مرکز واکنش با افزایش تنش در گیاه افزایش یافت ، در گیاه کنترل در نور ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه افزایش این شاخص را در مقایسه با تیمار کنترل در تاریکی و ۳۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه شاهد بودیم.(شکل ۱ قسمت ه).

نتایج مقایسه میانگین حاصل از داده‌های PI_{ABS} نشان داد که بیشترین شاخص جذب فوتون در تیمار عدم کاربرد دی اکسید گوگرد و در تاریکی مشاهده گردید که این میزان با مقدار مشاهده شده در شدت نور ۳۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه تفاوتی معنی داری نداشت. کاربرد دی‌اکسید گوگرد در همه تیمارهای نوری منجر به کاهش میزان شاخص جذب فوتون گردید که کمترین مقادیر آن در حضور نور مشاهده شد (شکل ۱ قسمت ی).



نمودار ۱. نمودار تغییرات در الف) مقدار عملکرد کوانتومی فتوسیستم ۲ (F_v/F_m)، ب) میزان جذب نور به ازای هر مرکز واکنش (ABS/RC)، ج) میزان به دام انداختن الکترون به ازای هر مرکز واکنش (TR_o/RC)، د) انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET_o/RC)، ه) انرژی اتلاف شده به ازای هر مرکز واکنش(Di_o/RC) و ی) شاخص عملکرد جذب فوتون (PI_{ABS})

IrHC2019



شکل ۲. تاثیر غظلت ۲۰ ppm دی‌اکسید گوگرد در شدت‌های ۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه.

یکی از اثرات مهم نور بر فرآیندهای گیاهی تغییر در میزان گشودگی روزنه‌ها و در نتیجه تغییر در تبادلات گازی بین گیاه و محیط پیرامون آن است، علاوه بر این نور مهمترین عامل راه‌اندازی سیستم فتوسنتزی در گیاهان و موجودات فتوسنتز کننده است(Zhang *et al.*, 2003). زمانی که شدت نور زیاد است مقداری از انرژی جذب شده توسط رنگدانه‌های فتوسنتزی قابلیت استفاده در فتوسنتز را ندارد و افزایش آن منجر به اختلال در واکنش‌های فتوسنتزی (بازدارندگی نوری) یا در حالت شدیدتر باعث خسارت به ساختارهای فتوسنتزی در گیاه می‌شود (Strasser, *et al.*, 2010). تغییر در میزان شدت نور منجر به تغییر در واکنش‌های روزنه‌ای در گیاهان می‌شود که به واسطه آن میزان ورود و خروج گازها در گیاهان تغییر می‌کند. در بین گازهای موجود در اتمسفر دی‌اکسید گوگرد به عنوان یکی از مهمترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌های هوا منجر به ایجاد خسارت‌های فیزیولوژیک به گیاهان می‌شود. با افزایش غلظت دی‌اکسید گوگرد درون بافت گیاهی، سیستم‌های فیزیولوژیکی گیاه از جمله مراکز واکنش مربوط به سیستم فتوسنتزی دستخوش تغییر می‌شوند (Swanepoel *et al.*, 2007). نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که در برگ هایی که در معرض دی‌اکسید گوگرد و نور قرار داشتند، سیستم فتوسنتزی به طور کامل از بین رفته بود در حالی که در آنهایی که در شرایط تاریکی در معرض دی‌اکسید گوگرد بودند تاثیرات منفی کمتری مشاهده شد. با افزایش شدت نور میزان مراکز واکنش غیر فعال در سیستم فتوسنتزی گیاه افزایش یافت و همچنین قابلیت انتقال الکترون بین ناقل‌ها در این سیستم مختل شد، بنابراین میزان پراکندگی انرژی در شدت نور بالا بیشتر از سایر تیمار-های نوری بود. یکی از پیامدهای اصلی و اولیه‌ی تنش‌های محیطی از جمله دی‌اکسید گوگرد از بین بردن مراکز واکنش و زنجیره انتقال الکترون است که در نهایت منجر به کاهش یا از بین رفتن عملکرد کوانتومی فتوسیستم‌ها در گیاهان می‌شود. طبق نتایج به دست آمده نمونه‌هایی که در معرض دی‌اکسید گوگرد تحت تیمار تاریکی قرار گرفتند میزان جذب الکترون در سیستم فتوسنتزی نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته در حالی که در میزان انتقال الکترون در این نمونه‌ها تغییری ایجاد نشده بنابراین منجر به افزایش پراکندگی انرژی و کاهش استفاده از فوتون‌ها در سیستم فتوسنتزی شده است. ارزیابی عملکرد فتوسیستم II در تست OJIP مشخص می‌شود؛ کاهش در مقدار شاخص عملکرد جذب فوتون منجر به کاهش در عملکرد کوانتومی، انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش و افزایش پراکندگی الکترون به ازای هر مرکز واکنش می‌شود. با افزایش

IrHC2019

شدت نور روزنه‌ها باز خواهد شد و ورود گاز به داخل برگ افزایش می‌یابد، با افزایش غلظت گاز مراکز واکنش به طور کاملا برگشت ناپذیری از بین می‌روند.

منابع

Chauhan, A. and P. Joshi 2010. "Effect of ambient air pollutants on wheat and mustard crops growing in the vicinity of urban and industrial areas." New York Sci. J 3(2): 52-60.
Dhir, B. 2016. Air pollutants and photosynthetic efficiency of plants. Plant responses to air pollution, Springer: 71-84.
Fu, W., Li, P. and Wu., Y. 2012. "Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce." Scientia horticulturae 135: 45-51.
Kalhor, M., Aliniaeifard, S., Seif, M., Asayesh, E., Bernard, F., Hassani, B. AND Li, T. 2018. "Enhanced salt tolerance and photosynthetic performance: Implication of ɤ-amino butyric acid application in salt-exposed lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants." 130: 157-172.
Lee, H., Khaine , I., Kwak, M., Jang, J., Lee, T., Lee, J., Kim, I., Kim, W., Oh, K. and Woo, S. 2017. "The relationship between SO_2 exposure and plant physiology: A mini review." Horticulture, Environment, and Biotechnology 58(6): 523-529.
Ooi, L., Matsuura, T., Munemasa, S., Murata, Y., Katsuhara, M., Hirayama, T. and Mori I. 2018. "The Mechanism of SO_2-Induced Stomatal Closure Differs from O_3 and CO_2 Responses and Is Mediated by Non-Apoptotic Cell Death in Guard Cells." Plant, cell & environment.
Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M, Qiang, S. and Goltsev, V. 2010. "Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant Haberlea rhodopensis." 1797(6-7): 1313-1326.
Swain, S. and S. Padhi 2015. "Effect of Sulphur dioxide on growth, Chlorophyll and sulphur contents of Pomegranate." Tropical Agricultural Research and Extension 16(1).
Swanepoel, J., Krüger, G. and Van Heerden, P, 2007. "Effects of sulphur dioxide on photosynthesis in the *succulent Augea* capensis Thunb." 70(2): 208-221.
Zhang, S., Ma, K. and Chen, k. 2003. "Response of photosynthetic plasticity of *Paeonia suffruticosa* to changed light environments." Environmental and experimental botany 49(2): 121-133.

Toxic effects of sulfur dioxide gas on the quantum photosystem II efficiency in Chrysanthemum under different light intensities

Fardad Didaran[1], Sasan Aliniaeifard[2]*, Mostafa Arab [2],Mahmoud Reza Roozban[2], Mahboobeh Zare Mehrjerdi[2]
[1*]Master Student of Ornamental plants, Horticulture Department, Aburaihan Campus, Tehran University
[2]Horticulture Department, Aburaihan Campus, Tehran University
[*]Sasan Aliniaeifard: aliniaeifard@ut.ac.ir

Abstract
One of the most important and dangerous pollutants in the air is sulfur dioxide, which accumulation at high concentrations causes physiological and biochemical changes in plants. In addition, light is one of the most important environmental parameters that can change in plant physiology and photosynthesis processes. Therefore, we investigate the effects of light intensity and sulfur dioxide concentration on photochemical efficacy of Chrysanthemum in this study, three light intensities of 0, 300 and 600 µmol $m^{-2}s^{-1}$and two concentrations of 0 and 20 ppm sulfur dioxide for 6 hours were used. The results showed that the quantum photosystem II efficiency (Fv / Fm), the absorbance of light per reaction center (ABS / RC), the trapping of electron per reaction center (TRo / RC), electron transfer per reaction center (ETo / RC), the energy dissipated per reaction center (DI_o / RC) and photon absorption function index (PI_{ABS}) in sulfur dioxide treatment, light and their interactions, have a significant difference in The level of 1%.Based on the results, it can be deduced that sulfur dioxide at high light intensities destroys the photosynthetic system of the plant and the electron transfer chain, thereby reducing the efficiency of photosynthesis.

***Keywords*:** Air Pollution, Chrysanthemum, The electron transport chain in photosystem II, Light

IrHC2019