



تأثیر نورهای LED و الیستور بر شاخص‌های فتوسنتزی گل میمون

سحر سرداری، یونس پوربیرامی هیر*، اسماعیل چمنی

گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

✉ Younes-ph62@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۹

چکیده

گل میمون، متعلق به تیره گل میمون می‌باشد. این گیاه چند ساله بوده که به صورت یکساله کشت می‌شود. در واقع باید این گیاه را در مناطق با زمستان سرد به صورت یکساله و در نواحی با زمستان نه چندان سرد (حداقل دمای زمستان ۱۰ درجه سلسیوس) به صورت دو ساله کشت کرد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ترکیبی طیف‌های مختلف نور LED و غلظت‌های مختلف نانولوله‌های کربنی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه گل میمون انجام شد. آزمایش در شرایط کنترل شده و به صورت فاکتوریل با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل نور LED سفید، آبی، قرمز و ترکیبات مختلف آنها، ۸۰ درصد نور آبی + ۲۰ درصد نور قرمز، ۶۰ درصد نور آبی + ۴۰ درصد نور قرمز، ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی و ۶۰ درصد نور قرمز + ۴۰ درصد نور آبی و سه غلظت مختلف (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) نانولوله‌های کربنی بودند. پارامترهای مورد ارزیابی شامل میزان کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و فلورسانس کلروفیل بودند. نتایج نشان داد که هم طیف‌های نور LED و هم نانولوله‌های کربنی تأثیر معنی‌داری بر رشد و پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه گل میمون داشتند. طیف‌های مختلف نور LED تأثیرات متفاوتی بر میزان کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و فلورسانس داشتند. ترکیب نور قرمز و آبی اغلب نتایج مثبتی را به همراه داشت. نانولوله‌های کربنی، به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر، بر هدایت روزنه‌ای و فلورسانس تأثیر گذاشتند. تعامل آن‌ها با تیمارهای نوری، پاسخ‌های گیاه را بیشتر تعدیل می‌کرد. میزان کلروفیل به‌عنوان شاخص اصلی کارایی فتوسنتز، تحت تأثیر معنی‌دار هر دو تیمار نور و نانولوله قرار گرفت. همچنین هدایت روزنه‌ای نیز تحت تأثیر قرار گرفت. اندازه‌گیری فلورسانس نیز نتایج را در مورد کارایی استفاده از انرژی نور در فتوسنتز ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: کلروفیل، فلورسانس، نانولوله‌های کربنی، هدایت روزنه‌ای.

مقدمه

گل میمون از تیره گل میمون^۱ می‌باشد. این گیاه چند ساله بوده که به صورت یکساله کشت می‌شود. یکی از روش‌هایی که برای بهبود ویژگی‌های مورفولوژیکی در گیاهان استفاده می‌شود، تغییر کیفیت نور می‌باشد (Dehkhodi et al., 2018). نور



یکی از فاکتورهایی است که در رشد و گلدهی گیاهان تأثیر بسزایی دارد و گیاهان در تمام مراحل زندگی خود از جوانه‌زنی تا تولید گل و بذر به نور نیاز دارند (Yeh & Chung, 2009). با این وجود، گیاهان رفتارهای متفاوتی را در شدت‌های گوناگون از خود نشان می‌دهند (Mani, 2015). استفاده از نورهای مصنوعی در صنعت کشاورزی به‌خصوص در چند سال اخیر در حال گسترش بوده است. برای تحریک رشد در گیاهان در شرایطی که نور کم است از نورهای مصنوعی استفاده می‌شود (Maroow, 2008). Wang و همکاران (2021) در آزمایشی برای بررسی دیود ساطع نور (LED)^۱ قرمز و آبی بر رشد و ویژگی‌های فتوسنتزی خیار چنبر^۲، از سه طیف نور ۱۰۰ درصد نور آبی، ۱۰۰ درصد نور قرمز و ۱۰۰ درصد نور سفید با شدت ۵۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه استفاده کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با نور سفید، به‌طور قابل توجهی قطر ساقه در نور آبی بیشتر شد و افزایش جوانه‌زنی، ارتفاع گیاهچه و محتوای قند محلول در نور قرمز اتفاق افتاد. اندازه‌گیری ویژگی‌های فتوسنتزی نشان داد که تیمارهای قرمز و آبی می‌توانند در افزایش هدایت روزنه‌ای برگ مؤثر باشند. بنابراین، چنین پیشنهاد شد که خیار چنبر به‌طور معمول یک گیاه آفتاب‌دوست با مقدار ^{3}Dr پائین‌تر می‌باشد. به‌طور خلاصه، نتیجه‌گیری شد که نور آبی تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی، رشد گیاهچه، بروز جنسیت و بهبود عملکرد فتوسنتزی دارد و کمک می‌کند ارتباط بین کیفیت نور در بروز جنسیت روشن شود. در پژوهشی تأثیر طیف‌های نوری بر برخی شاخص‌های رشد و ظرفیت آنتی اکسیدانی گیاه بابونه گیلانی^۴ بررسی شد و از سه طیف نوری سفید، قرمز + آبی و قرمز دور استفاده شد. نتایج نشان داد که طیف نوری قرمز + نور آبی در مقایسه با سایر طیف‌های نوری باعث افزایش وزن‌تر، وزن خشک، محتوای نسبی آب و طول ریشه شد. همچنین بیشترین میزان پراکسید هیدروژن در این طیف و کمترین میزان پراکسید در طیف نوری نور قرمز + نور آبی مشاهده شد، اما در بین طیف‌های نوری در میزان محتوای پراکسید هیدروژن تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. بیشترین طول ساقه در گیاهچه‌های تیمار شده توسط نور قرمز دور مشاهده شد با اینکه در طیف نوری سفید حداکثر فعالیت آنتی اکسیدانی، محتوای فنل و فلاونوئیدی ثبت شد اما کاهش رشد در گیاهچه‌های تحت تیمار با نور سفید در گیاه گزارش شد که به‌علت منبع کربن و انرژی برای بیوسنتز ترکیبات آنتی اکسیدانی بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده مناسب‌ترین طیف نوری برای کشت گیاه بابونه گیلانی، طیف ترکیبی نور قرمز + نور آبی گزارش شد (Soltani et al., 2020).

نانو مولکول‌ها، موادی نوظهور هستند که با بهره‌گیری از فناوری نانو تولید شده‌اند. این ساختارها قابلیت انجام تغییرات و دستکاری در مقیاس نانومتری را فراهم ساخته و در تسهیل و تسریع واکنش‌های شیمیایی نقش مؤثری ایفا می‌کنند در این میان، نانولوله‌های کربنی به عنوان یکی از دگرشکل‌های اتم‌های کربن، طی سال‌های اخیر شناسایی و معرفی شده‌اند (Pourbeyrami Hir et al., 2024). نانولوله‌های کربن^۵ یکی از این مواد پرکاربرد در جنبه‌های مختلف علوم کشاورزی از جمله جوانه‌زنی و رشد گیاهان مختلف است (Pezhohan et al., 2015). اکتشافات جدید در حوزه‌ی نانو تکنولوژی به عنوان پلتفرم‌های پیشرفت برای تعدادی از برنامه‌های کاربردی در علوم پزشکی، هوا فضا، الکترونیک و صنایع دفاعی را فراهم کرد (Liu et al., 2006; Sing, 2010). نانولوله کربن از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای تو خالی ساخته شده است که توسط ایجیما (Iijima, 1991) کشف شد و به دلیل خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله خواص عالی الکتریکی و استحکام کششی خوب از یک طرف و از طرف دیگر طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (کربن ماده‌ای است کم وزن،



بسیار پایدار و ساده برای انجام فرایندها که برای تولید نسبت به فلزات دیگر ارزان تر است) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پر باری روش های رشد نانو لوله ها باشیم (Li et al., 2005) توانایی نانو ذرات در نفوذ به سلول های گیاهی باعث ایجاد علاقه در امکان استفاده از نانو ذرات به عنوان روشی در سیستم درمانی هوشمند در گیاهان شده است (Khodakovkaya et al., 2013). یافته های محققان حاکی از آن است که نانو ذرات، هم اثر مثبت و هم اثر منفی روی رشد و نمو گیاهان دارند و این تأثیر در گیاهان بستگی به ترکیب، غلظت، اندازه و خواص فیزیکی و شیمیایی نانو ذرات و همچنین گونه گیاهی، مرحله ی رشدی گیاه، روش و مدت زمان قرار گرفتن در معرض آنها دارد (Gorbanpour & Hatami, 2014; Opara, 2004). نانو ذرات در دزهای پایین قادر به فعال سازی فرایندهای فیزیولوژیکی موجود در گیاهان هستند (Khodakovkaya et al., 2013) که این نانو موادهای می توانند به عنوان ترکیبات سیگنال برای واکنش های متابولیکی و فیزیولوژی عمل کنند، اما اساس مکانسیم آنها بطور کامل مشخص نشده است (Gorbanpour & Hatami, 2014). انواع مختلف نانو مواد اعم از نانو مواد فلزی و نانو مواد بر پایه کربنی قادر به ایجاد تنش در گیاهان هستند، اما اثرات مثبت نانو لوله های کربنی در سیستم های زیستی و گیاهی بیشتر گزارش شده است، بطوری که از نانو لوله های کربنی در تنظیم رشد گیاهان زینتی و سایر گیاهان مورد استفاده در سوخت های زیستی، همچنین گیاهانی که بطور خاص برای استخراج متابولیت ها و پروتئین ها تولید می شوند مورد استفاده قرار می گیرند (Khodakovkaya et al., 2013).

پژوهشی تحت عنوان اثر نورهای LED بر شاخص مورفولوژیک و فیزیولوژیک در گیاه مرزنگوش توسط Khangoli و Khalili (۲۰۱۹) انجام گرفت که تیمارها شامل نور قرمز ۱۰۰ درصد، نور آبی ۱۰۰ درصد، ۷۰ درصد نور قرمز + ۳۰ درصد نور آبی و فلورسنت (شاهد) بود. پس از گذشت ۱۲۰ روز داده برداری از نمونه انجام شد. نتایج حاصل از داده برداری نشان داد که افزایش در تعداد برگ، وزن تر و وزن خشک ریشه و طول ریشه در گیاهچه های تحت تیمار در نور قرمز ۱۰۰ درصد مشاهده شد. همچنین نور قرمز منجر به افزایش ۱۶/۵۳ درصد ماده خشک در مقایسه با نور شاهد شد. بیشترین سطح برگ، وزن اندام هوایی و عملکرد وزن برگ در گیاهچه های تحت تیمار با نور آبی ۱۰۰ درصد گزارش شد. در طیف های نوری آبی ۱۰۰ درصد، نور قرمز ۱۰۰ درصد و فلورسنت (شاهد) منجر به افزایش نسبت وزن تر ریشه به وزن خشک ریشه شد. افزایش ارتفاع در گیاهچه های تحت تیمار طیف ترکیبی نوری قرمز + نور آبی بود، همچنین در مقایسه با نور شاهد منجر به افزایش ۲۶/۵۸ درصد قطر ساقه شد. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر هفت طیف مختلف نوری (نور سفید، نور قرمز، نور آبی، ۸۰ درصد نور آبی + ۲۰ درصد نور قرمز، ۶۰ درصد نور آبی + ۴۰ درصد نور قرمز، ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی و ۶۰ درصد نور قرمز + ۴۰ درصد نور آبی) به همراه تیمار نانولوله کربن تک جداره روی خصوصیات رشدی گل میمون بود.

مواد و روش ها

برای انجام این پژوهش بذر گل میمون از شرکت پاکان بذر تهیه شده و آزمایش در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. طرح آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. برای این منظور ابتدا بذرها در سینی نشاء کاشته شده و در مرحله ۴ برگگی به گلدان سایز ۴ با خاک به نسبت ۱:۱:۱ (مواد آلی، ماسه، خاک باغچه) انتقال داده شدند. همچنین مواد نانو لوله کربن تک جداره تهیه و در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه محقق اردبیلی توسط دستگاه اولتراسونیک خشک حل شد. تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش طیف خاصی از نورهای (LED نور سفید، نور قرمز، نور آبی، ۸۰ درصد نور آبی + ۲۰ درصد نور قرمز، ۶۰ درصد نور آبی + ۴۰ درصد نور قرمز، ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی) بود.



درصد نور آبی و ۶۰ درصد نور قرمز + ۴۰ درصد نور آبی) و سه غلظت از نانولوله کربن (شاهد، ۵۰ میلی گرم در لیتر و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) بود که در ۴ مرحله بصورت محلول پاشی بر روی گیاهچه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ۷ عدد باکس مربعی شکل با اضلاع ۱۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۱۳۰ سانتی متر با تنه ترکیبی از چوب و آلومینیوم تهیه شد. پوشش سطح درونی و بیرونی باکس‌ها به رنگ سفید و از جنس پارچه با پوشش PVC بود. داخل هر باکس ۴ عدد لامپ LED بصورت موازی نصب گردید. به دلیل کنترل دمای داخل باکس فنی تعبیه شد که بصورت خودکار از ساعت ۱۰ صبح الی ۱۷ عصر روشن بود. همه صفات بیوشیمیایی با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل JENWEAY 6705 uv/vis قرائت شد.

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل

برای سنجش میزان کلروفیل از برگ‌های تازه گیاهچه‌ها استفاده شد. بدین منظور ۰/۱ گرم از بافت تر گیاهی در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد ساییده و محلول حاصل به‌طور کامل به لوله‌های سانتریفوژ منتقل گردید. لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ و محاسبه مقدار کلروفیل در محلول رویی صاف شده با کاغذ صافی براساس روش Dors و همکاران (۱۹۹۸) انجام شد. طبق این روش با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل JENWEAY 6705 uv/vis مقدار جذب نوری محلول‌ها در طول موج ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت و مقدار کلروفیل a، b و کارتنوئید طبق رابطه ۱ تا ۳ محاسبه گردید.

1. Chlorophyll a = $12.25 A_{663} - 2.79 A_{645}$
2. Chlorophyll b = $21.5 A_{645} - 5.1 A_{663}$
3. Carotenoides = $(1000A_{470} - 1.82 \text{ chl a} - 85.25 \text{ chl b})/198$

اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای

هدایت روزنه‌ای با دستگاه پرومتر (Prometer SC-1 (Meter Group, Inc. Washington, USA) اندازه‌گیری شد. بدین منظور از هر تکرار سه برگ فعال و کاملاً توسعه یافته به‌طور تصادفی انتخاب شد به‌طوری که ۳۰ ثانیه پس از قرار گرفتن برگ گیاه بین گیره‌های دستگاه، هدایت روزنه‌ای خوانده شد. مقادیر به‌طور معمول بین ساعات ۰۸:۳۰ و ۱۱:۳۰ و در دمای اتاق ثبت شد.

اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل، ابتدا برگ‌های کاملاً توسعه یافته به‌طور تصادفی انتخاب شده از هر گیاه، توسط دستگاه فلوریمتر (Hansatech Instruments Ltd. King's Lynn، انگلستان) اندازه‌گیری شد. این دستگاه برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل حاوی گیره‌هایی می‌باشد که از قبل بر روی برگ‌های انتخابی بسته شده و حدود ۳۰ ثانیه قسمت مشخص برگ داخل این گیره‌ها با تاریکی سازگار شد، سپس دیود ساطع‌کننده نور (LED) به گیره متصل شد تا فلورسانس اندازه‌گیری شود و پس از گذشت زمان تعیین‌شده، گیره باز شد و داده‌ها خوانده شد.

برای تجزیه آماری از نرم افزار SAS 9.1 استفاده شد، مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامن‌های دانکن و رسم نمودار با استفاده از اکسل انجام شد.



نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها، نشان داد که تأثیر نور و اثر متقابل نور $\times$ نانولوله کربن، بر میزان کلروفیل a و کلروفیل کل در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. همچنین، اثر متقابل نور $\times$ نانولوله کربن بر میزان کلروفیل b در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۱).

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که شاخص $Fv/F0$ بطور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده نور قرار گرفت اما اثر ساده نانولوله کربن و همچنین اثر متقابل نور $\times$ نانولوله کربن معنی‌دار نشد (جدول ۱).

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر نور و نانولوله کربن بر شاخص‌های بیوشیمیایی در گل میمون.

table 1. Analysis of variance for the effect of light and carbon nanotubes on biochemical indices in Snapdragon.

میانگین مربعات Ms						منابع تغییرات Sources of change
Fv/F0	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a	درجه آزادی dF		
1.25**	2.48*	20.27**	5.57*	17.78**	6	نور Light
0.37 ^{ns}	3.005*	12.87*	3.39*	3.64 ^{ns}	2	نانو لوله کربن Carbon nanotubes
0.44 ^{ns}	1.37 ^{ns}	18.38**	2.53**	13.09**	12	نور $\times$ نانو لوله کربن $\times$ Carbon nanotubes
0.27	0.95	4.5	0.96	3.64	42	خطای آزمایش Error
12.21	11.29	9.91	12.51	11.2	—	ضریب تغییرات CV

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

^{ns}, * and ** are non-significant and significant at the five percent, one percent probability level, respectively

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) صفت هدایت روزنه‌ای زیر تأثیر اثر ساده نور و اثر متقابل نور $\times$ نانولوله کربن قرار گرفت اما اثر ساده نانولوله کربن معنی‌دار نشد. همچنین، بر پایه تجزیه واریانس داده‌ها، شاخص $F0$ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده نور و اثر متقابل نور $\times$ نانولوله کربن قرار گرفت اما در اثر ساده نانولوله کربن معنی‌دار نشد (جدول ۲).

هدایت روزنه‌ای

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین شاخص هدایت روزنه‌ای در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور آبی در کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانولوله کربن مشاهده شد. کمترین شاخص هدایت روزنه‌ای تیمار نوری ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی و عدم کاربرد نانولوله کربن مشاهده شد (شکل ۱).



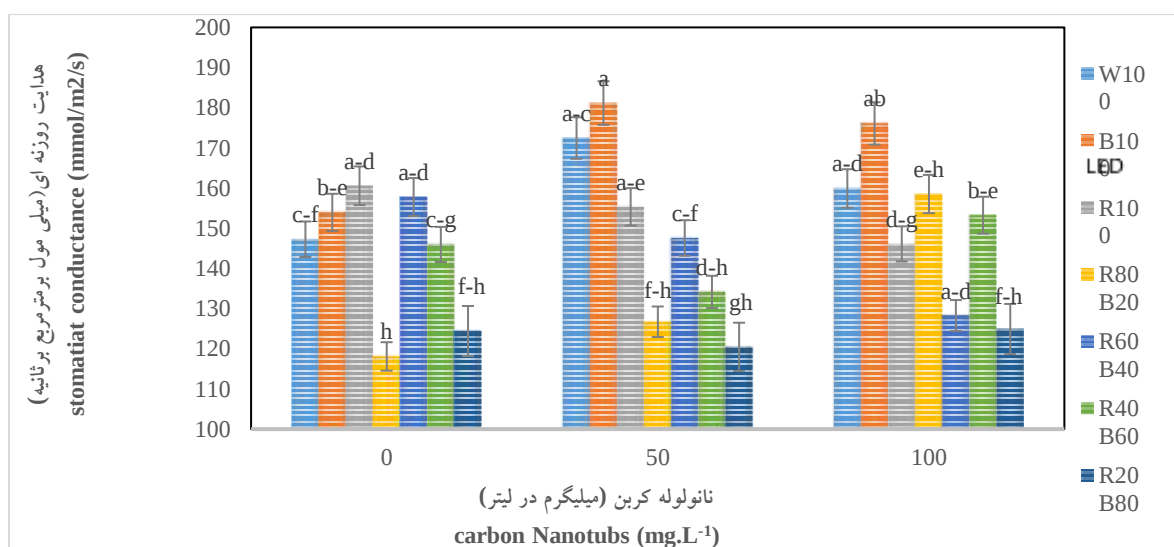
جدول ۲. تجزیه واریانس اثر نور و نانولوله کربن بر شاخص‌های بیوشیمیایی در گل میمون.

table 2. Analysis of variance for the effect of light and carbon nanotubes on biochemical indices in Snapdragon.

میانگین مربعات				
MS				
منابع تغییرات	F0	F0/Fm	درجه آزادی	منابع تغییرات
Sources of change			df	
نور	3311.83**	0.0007**	6	the light
نانو لوله کربن	476.92 ^{ns}	0.0009**	2	Carbon nanotubes
نور×نانو لوله کربن	2734.43**	0.0005 ^{ns}	12	light×Carbon nanotubes
خطای آزمایش	666.12	0.0003	42	Error
ضریب تغییرات	7.27	10.44	—	CV

ns, * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns, * and ** are non-significant and significant at the five percent, one percent probability level, respectively



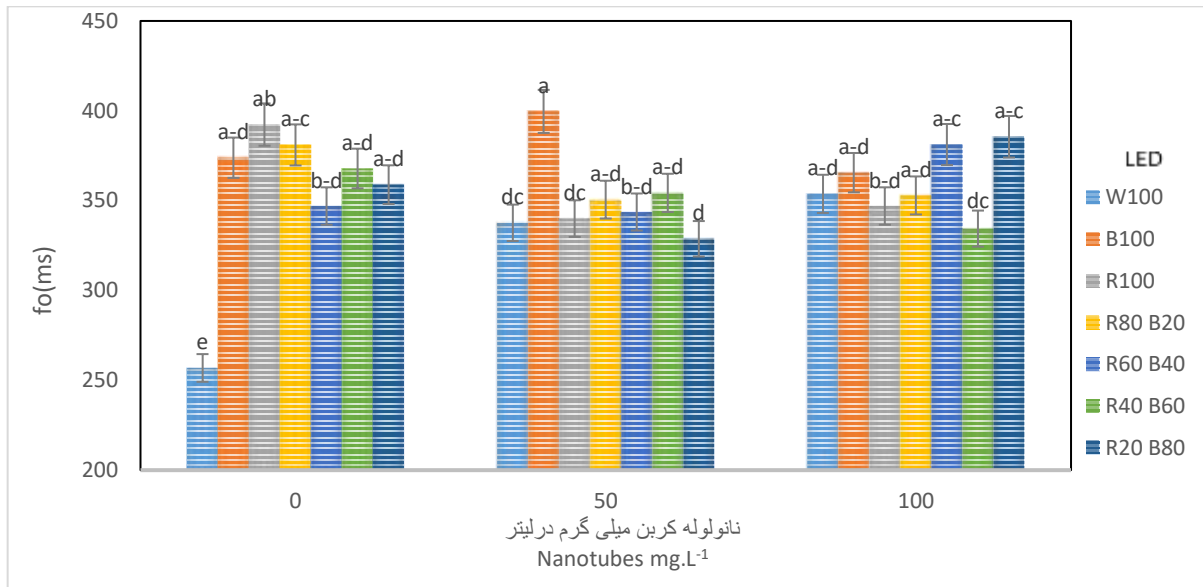
شکل ۱- مقایسه میانگین تیمارهای نوری و نانولوله کربن (میلی گرم در لیتر) بر هدایت روزنه‌ای. مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 1. Comparison of means for light treatments and carbon nanotube concentrations (mg.L⁻¹) on stomatal conductance. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.



F0

بیشترین مقدار فلورسانس حداقل (F0) در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور آبی در کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. کمترین میزان شاخص F0 در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور سفید و عدم کاربرد نانولوله کربن مشاهده شد (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین تیمار طیف‌های مختلف نوری و نانولوله کربن (میلی گرم در لیتر) بر F0. مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

"Figure 2. Comparison of Means for Light Treatments and Carbon Nanotube Concentrations (mg.L⁻¹) on F0" The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

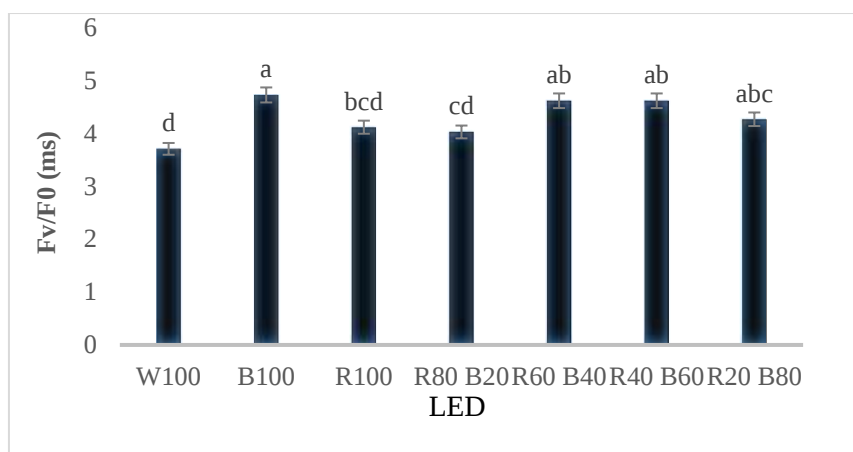
Fv/F0

مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد که بیشترین شاخص Fv/F0 در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور آبی مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۶۰ درصد نور قرمز + ۴۰ درصد نور آبی، ۲۰ درصد نور قرمز + ۸۰ درصد نور آبی و ۴۰ درصد نور قرمز + ۶۰ درصد نور آبی نداشت. کمترین شاخص Fv/F0 تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور سفید مشاهده شد (شکل ۳).

F0/Fm

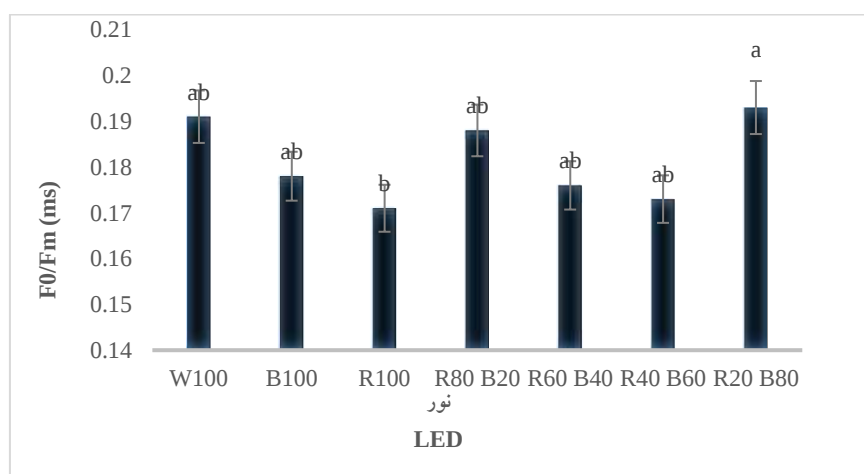
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بیشترین شاخص F0/Fm در تیمار نوری ۲۰ درصد نور قرمز + ۸۰ درصد نور آبی حاصل شد. کمترین شاخص F0/Fm در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور قرمز مشاهده شد (شکل ۴). تیمار نانولوله کربن باعث افزایش شاخص F0/Fm شد؛ به‌طوری که بیشترین شاخص F0/Fm در تیمار ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن نداشت. کمترین شاخص F0/Fm در تیمار شاهد (عدم کاربرد نانولوله کربن) مشاهده شد (شکل ۵).





شکل ۳- تأثیر تیمار طیف‌های مختلف نوری بر میانگین شاخص F_v/F_0 . مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجود نداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 3. Effect of Light Treatments on Mean F_v/F_0 Index. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.



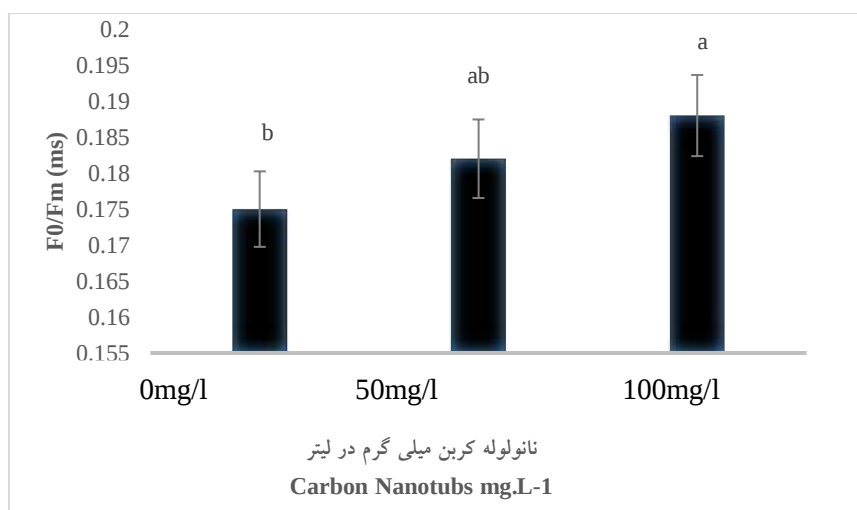
شکل ۴- تأثیر تیمار طیف‌های مختلف نوری بر میانگین شاخص F_0/F_m . مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجود نداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 4. Effect of different light treatments on mean F_0/F_m index. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

کارت‌نویس

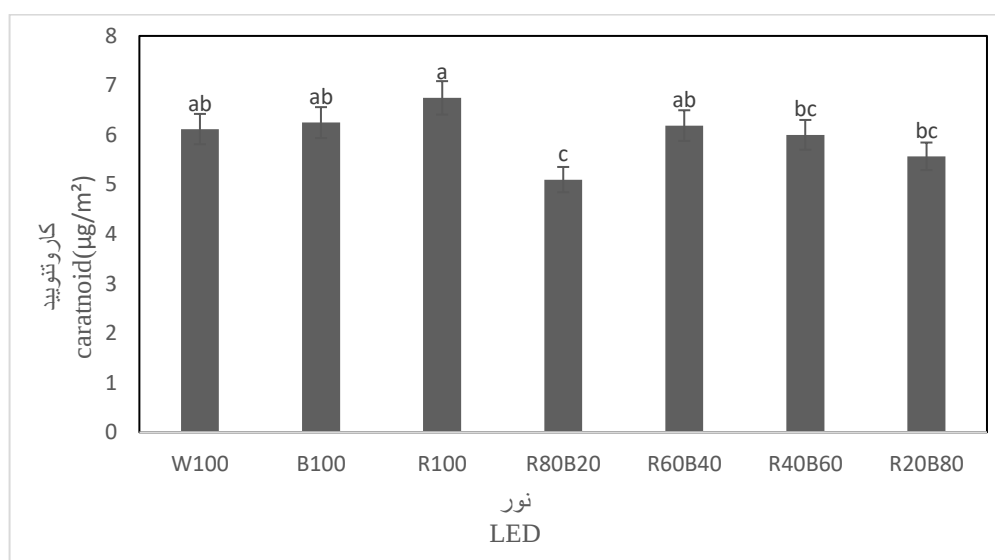
طبق نتایج به‌دست آمده بیشترین میزان کارت‌نویس در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور قرمز و کمترین میزان کارت‌نویس در نور ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی مشاهده شد (شکل ۶).
مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین میزان کارت‌نویس در ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از نانو لوله کربن و کمترین میزان کارت‌نویس در ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو لوله کربن حاصل شد (شکل ۷).





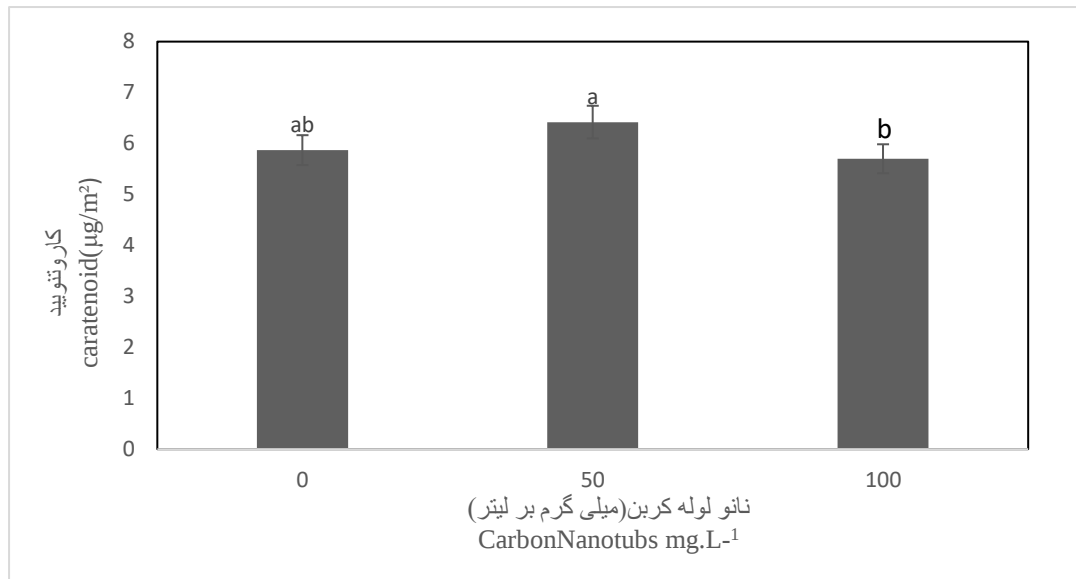
شکل ۵- تأثیر تیمار نانو لوله کربن بر میانگین شاخص F0/Fm. مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 5. Effect of Carbon Nanotube Treatment on Mean F0/Fm Index. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.



شکل ۶- تأثیر تیمار طیف‌های مختلف نوری بر میزان شاخص کارتنوئید. مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 6. Effect of Light Treatments on Mean Carotenoid Index. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test



شکل ۷- تأثیر تیمار طیف‌های مختلف نوری بر میزان شاخص کارتنوئید. مقادیر میانگین سه تکرار $\pm$ انحراف معیار هستند و حروف یکسان وجودنداشتن اختلاف معنادار با استفاده از آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

Figure 7. Effect of Carbon Nanotube Treatment on Mean Carotenoid Index. The values are the mean values of tree repetitions $\pm$ standard deviation and the same letters indicate the absence of significant difference using Duncan's test.

میزان سنجش کلروفیل

بر اساس نتایج به‌دست آمده در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور قرمز بیشترین میزان کلروفیل a و کمترین میزان آن در تیماری نوری ۱۰۰ درصد نور سفید مشاهده شد (جدول ۳). همچنین طبق نتایج حاصل میزان کلروفیل b و میزان کلروفیل کل بیشترین مقدار هر دو شاخص در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور آبی در عدم کاربرد نانو لوله کربن، و کمترین میزان هر دو شاخص در تیمار نوری ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی در کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو لوله کربن مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین تیمارهای نوری و نانولوله کربن (میلی‌گرم در لیتر) بر کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل

Table 3. Comparison of Means for Light Treatments and Carbon Nanotube Concentrations (mg/L) on Chl a Chl b.T chl.

Chlorophylla µg/L کلروفیل a	Chlorophyllb µg/L کلروفیل b	Chlorophyll total µg/L کلروفیل کل	Carbon nanotubes نانولوله کربن	LED نور
13/63 $\pm$ 1/24	۵/۲۷ $\pm$ ۰/۷۲	۱۸/۸۸ $\pm$ ۱/۳۶	0	نور سفید White100
15/258 $\pm$ 1/098	۴/۱۸ $\pm$ ۰/۶۴	۱۹/۴۴ $\pm$ ۱/۷۴	50	
۱۷/۴۲ $\pm$ ۱/۰۹	۴/۶۳ $\pm$ ۰/۸۴	۲۲/۰۶ $\pm$ ۱/۸۷	100	
۲۰/۳۱ $\pm$ ۱/۰۷	۶/۰۲۰ $\pm$ ۱/۲۹	۲۶/۵۱ $\pm$ ۰/۵۲	0	نور آبی Bolu100
۱۸/۱۹ $\pm$ ۲/۰۷	۴/۶۸ $\pm$ ۰/۳۸	۲۲/۸۸ $\pm$ ۲/۴۲	50	
۱۹/۱۸ $\pm$ ۲/۰۰۴	۳/۰۲ $\pm$ ۱/۷۵	۲۲/۲۰ $\pm$ ۳/۴۴	100	
۱۵/۶۵ $\pm$ ۲/۷۶	۳/۹۵ $\pm$ ۰/۷۹	۱۹/۶۳ $\pm$ ۳/۵۲	0	نور قرمز Red100



۲۱/۷۸±۰/۲۴	۴/۹۶±۰/۱۸	۲۶/۷۴±۰/۴۲	50	
۱۶/۴۵±۱/۸۳	۳/۸۴±۰/۵۶	۲۰/۳۰±۱/۲۷	100	
۱۸/۲۴±۲/۵۱	۴/۰۴±۰/۶۴	۲۲/۲۹±۲/۸۹	0	R80B20 نور قرمز ۸۰ نور آبی ۲۰
۱۵/۶۹±۲/۲۶	۳/۷۸±۱/۰۲	۱۹/۴۷±۱/۶۰	50	
۱۴/۴۹±۱/۵۰	۲/۷۵±۱/۴۷	۱۷/۲۴±۰/۴۸	100	
۱۵/۵۷±۲/۱۳	۳/۸۲±۰/۵۶	۱۹/۳۹±۲/۳۰	0	R60B40 نور قرمز ۶۰ نور آبی ۴۰
۱۷/۷۶±۰/۸۷	۴/۷۰±۰/۵۴	۲۲/۴۶±۱/۳۴	50	
۱۸/۲۵±۳/۵۷	۴/۱۰±۰/۶۳	۲۲/۳۵±۴/۱۰	100	
۱۷/۰۰۷±۲/۳۴	۳/۳۱±۱/۹۷	۲۰/۳۲±۱/۳۴	0	R40B60 نور قرمز ۴۰ نور آبی ۶۰
۱۹/۶۰±۱/۵۹	۴/۸۰±۱/۰۰۳	۲۴/۴۱±۲/۲۰	50	
۱۶/۶۸±۲/۰۰۴	۵/۴۰±۰/۵۳	۲۲/۰۹±۲/۱۵	100	
۱۷/۶۱±۰/۲۲	۴/۵۸±۱/۰۸	۲۲/۲۰±۱/۲۹	0	R20B80 نور قرمز ۲۰ نور آبی ۸۰
۱۴/۱۳۱/۹۴±	۵/۸۲±۱/۲۴	۲۰/۱۳±۱/۵۹	50	
۱۴/۶۹±۲/۱۰	۳/۶۶±۰/۴۱	۱۸/۳۶±۱/۷۸	100	

بحث

این مطالعه تأثیر نورهای LED و نانولوله‌های کربنی را بر شاخص‌های فتوسنتزی گل میمون بررسی کرد و نشان داد که هر دو عامل به‌طور قابل توجهی بر رشد و پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاه تأثیر دارند. نتایج آزمایش‌های ما نشان داد که نور ۱۰۰ درصد قرمز باعث افزایش میزان کلروفیل a و کارتنوئیدها شد، در حالی که نور ۱۰۰ درصد آبی بیشترین میزان کلروفیل b و کلروفیل کل را در شرایط بدون کاربرد نانولوله کربنی به همراه داشت. این یافته‌ها با نتایج بیات و همکاران (۲۰۱۸) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند نور قرمز باعث افزایش جذب انرژی و کارایی فتوسنتزی در گل رز رقم سامورایی^۱ می‌شود (Bayat et al., 2018). همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای روی خیار چنبر نشان دادند که نور قرمز باعث افزایش محتوای قند محلول و بهبود عملکرد فتوسنتزی می‌شود، که با نتایج ما درباره تأثیر مثبت نور قرمز بر کلروفیل a و کارتنوئیدها هم‌راستاست (Wang et al., 2021). با این حال، نتایج ما در مورد کارتنوئیدها با یافته‌های ماری (۲۰۱۷) متفاوت است. او گزارش کرد که بیشترین میزان کارتنوئید در نور سفید در گل داودی^۲ مشاهده شده، در حالی که در مطالعه ما، نور ۱۰۰ درصد قرمز بیشترین کارتنوئید را نشان داد (Marie, 2017). با این تفاوت ممکن است به دلیل گونه‌های گیاهی مختلف (گل میمون در مقابل گل داودی) یا شرایط آزمایشی متفاوت باشد. شاخص هدایت روزنه‌ای نیز تحت تأثیر نور و نانولوله‌های کربنی قرار گرفت. بیشترین هدایت روزنه‌ای در نور ۱۰۰ درصد آبی با کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربنی مشاهده شد، که نشان‌دهنده بهبود تبادل گازی و کارایی فتوسنتزی است. این نتیجه با یافته‌های سلطانی و همکاران (۲۰۲۰) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند ترکیب نور قرمز و آبی در بابونه گیلانی باعث بهبود رشد و کاهش استرس اکسیداتیو می‌شود (Soltani et al., 2021). همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که نور آبی و قرمز می‌توانند هدایت روزنه‌ای را در خیار چنبر افزایش دهند، که با نتایج ما هم‌خوان است (Wang et al., 2021). با این حال، کمترین هدایت روزنه‌ای در نور ۸۰ درصد قرمز + ۲۰ درصد آبی بدون کاربرد نانولوله



کربنی مشاهده شد، که ممکن است به دلیل عدم تعادل در طیف نوری و کاهش کارایی فتوسنتزی باشد. این نتیجه با یافته‌های جوهکان و همکاران (۲۰۱۰) متفاوت است که گزارش کردند نور قرمز به‌تنهایی باعث افزایش سطح برگ و رشد در کاهوی قرمز^۳ می‌شود (Johkan et al., 2010). این تفاوت می‌تواند به دلیل نیازهای نوری خاص گل میمون در مقایسه با کاهو باشد. در مورد فلورسانس کلروفیل، شاخص Fv/F0 در نور ۱۰۰ درصد آبی بیشترین مقدار را داشت، که نشان‌دهنده کارایی بالای استفاده از انرژی نور در فتوسنتز است. این نتیجه با یافته‌های کائو و همکاران (۲۰۱۳) همخوانی دارد که گزارش کردند نور آبی باعث حفظ فعالیت فتوسیستم‌های I و II در خیار می‌شود (Cao et al., 2013). همچنین، شاخص F0/Fm در ترکیب ۲۰ درصد نور قرمز + ۸۰ درصد نور آبی و با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانولوله کربنی به بیشترین مقدار رسید، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تعامل نور و نانولوله‌ها بر کارایی فتوشیمیایی است. این یافته با نتایج خیرخواه و همکاران (۲۰۲۱) هم‌راستاست که نشان دادند نانولوله‌های کربنی در دزهای پایین می‌توانند فرآیندهای فیزیولوژیکی را در نعنای فعال کنند (Khazaei et al., 2021). با این حال، کمترین F0/Fm در نور ۱۰۰ درصد قرمز مشاهده شد، که ممکن است به دلیل کاهش کارایی فتوسیستم II در این طیف نوری باشد، نتیجه‌ای که با مطالعه جونگ و همکاران (۲۰۱۳) متفاوت است. آن‌ها گزارش کردند که نور قرمز باعث بهبود متابولیت‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در برنج می‌شود (Jung et al., 2013).

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از نورهای LED در ترکیب با نانولوله‌های کربنی تأثیر معنی‌داری بر بهبود شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گل میمون داشت. ترکیب طیف‌های نور قرمز و آبی، به ویژه در افزایش میزان کلروفیل و هدایت روزنه‌ای مؤثر بود که با یافته‌های (Khalili and Khangoli, 2019) در گیاه مرزنگوش همخوانی دارد. آن‌ها گزارش کردند که نور قرمز موجب افزایش ماده خشک و نور آبی باعث رشد بهتر اندام‌های هوایی گردیده است. علاوه بر این، استفاده از نانولوله‌های کربنی، به خصوص در غلظت‌های بالاتر، به طور معنی‌داری موجب بهبود میزان فلورسانس کلروفیل و هدایت روزنه‌ای گردید. این نتایج با یافته‌های (Pourbeyrami Hir et al., 2024) در گیاه مریم گلی^۱ مطابقت دارد که نشان دادند نانولوله‌های کربنی باعث افزایش کلروفیل a و b، محتوای فنل و فلاونوئید شدند. همچنین، (Khosravi Majdari et al., 2024) در پژوهشی روی گیاه رزماری^۲ به این نتیجه رسیدند که کاربرد نانولوله‌های کربنی در شرایط درون شیشه‌ای سبب افزایش میزان کلروفیل کل، کاروتنوئیدها و شاخص‌های رشد گردیده است. تأثیر نانولوله‌های کربنی نیز در این مطالعه قابل توجه بود. کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانولوله کربنی باعث افزایش کاروتنوئیدها و هدایت روزنه‌ای شد، اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان کاروتنوئیدها کاهش یافت. این نتیجه با یافته‌های گوران‌پور و حاتمی (۲۰۱۴) همخوانی دارد که گزارش کردند نانولوله‌های کربنی در دزهای پایین اثرات مثبت دارند، اما دزهای بالاتر می‌توانند تنش ایجاد کنند (Gorbanpour & Hatami, 2014). همچنین، خیرخواه و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که نانولوله‌های کربنی می‌توانند به‌عنوان سیگنال‌دهنده‌های متابولیکی عمل کنند، که با تأثیر مثبت دز ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در مطالعه ما همخوان است (Khazaei et al., 2021) با این حال، کاهش کاروتنوئیدها در دز ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر ممکن است به دلیل استرس ناشی از غلظت بالای نانولوله‌ها باشد، که با نتایج اوپارا (۲۰۰۴) درباره اثرات منفی نانومواد در دزهای بالا هم‌راستاست (Opara, 2004).

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که کیفیت نورهای LED و نانولوله‌های کربنی تأثیر قابل توجهی بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی فتوسنتزی گل میمون دارند. برهم‌کنش بین این دو عامل پیچیده است و ترکیبات مختلف آن‌ها منجر به نتایج متفاوتی در صفات مورد بررسی شده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که اثر متقابل نور و نانولوله کربن بر میزان کلروفیل a،



کلروفیل b، و کلروفیل کل معنی دار است. به طوری که بیشترین مقدار کلروفیل a (به عنوان شاخص کلیدی فتوسنتز) در تیمار نور ۱۰۰ درصد قرمز همراه با کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن مشاهده شد. این افزایش احتمالاً به دلیل تأثیر نور قرمز بر تحریک سنتز کلروفیل و جذب بهتر نور توسط نانولوله های کربنی است که می توانند به عنوان ناقل انرژی عمل کنند. در مقابل، بیشترین مقدار کلروفیل b و کلروفیل کل در تیمار نور ۱۰۰ درصد آبی به دست آمد، در حالی که کمترین مقدار این صفات در تیمار ترکیبی ۸۰ درصد نور قرمز + ۲۰ درصد نور آبی با کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن ثبت شد. این کاهش ممکن است ناشی از تجمع بیش از حد نانولوله ها باشد که می تواند استرس اکسیداتیو را در گیاه افزایش دهد و به ساختار کلروفیل آسیب بزند. همچنین، اثر مثبت تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور آبی همراه با کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن بر رشد و کارایی فتوسنتزی گل میمون مشاهده شد. نور آبی به طور کلی با تحریک رشد رویشی و افزایش بازده فتوسنتزی شناخته می شود، و به نظر می رسد که نانولوله های کربنی در این غلظت نقش مکمل را در بهبود انتقال انرژی نوری ایفا کرده اند. از سوی دیگر، بیشترین مقدار شاخص فلورسانس متغیر (Fv) که نشان دهنده سلامت سیستم فتوسنتزی است، در تیمار نوری ۱۰۰ درصد نور قرمز با کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن ثبت شد. این نتیجه نشان می دهد که نور قرمز در این شرایط بهینه، همراه با نانولوله ها، می تواند کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II را افزایش دهد. همچنین، بیشترین مقدار شاخص فلورسانس حداکثر (Fm) در تیمار ترکیبی ۴۰ درصد نور قرمز + ۶۰ درصد نور آبی مشاهده شد، و این تیمار از نظر آماری با تیمارهای ۱۰۰ درصد نور قرمز، ۱۰۰ درصد نور آبی، و ۶۰ درصد نور قرمز + ۴۰ درصد نور آبی اختلاف معنی داری نداشت. این شباهت آماری نشان دهنده انعطاف پذیری گل میمون در پاسخ به طیف های نوری مختلف است، اما نقش نانولوله ها در تعدیل این پاسخ ها نیز قابل توجه است.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که تأثیر نور قرمز در شرایط عدم کاربرد نانولوله کربن بیشتر است، که احتمالاً به دلیل تحریک مستقیم مسیرهای فتوسنتزی توسط این طیف نوری است. با این حال، در شرایط کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانولوله کربن، اثر ترکیبی نور آبی + نور قرمز بر رشد و کارایی فتوسنتزی گل میمون بیشتر بود. این تفاوت می تواند به دلیل تعامل نانولوله ها با نورهای ترکیبی باشد که باعث بهبود جذب و انتقال انرژی در گیاه می شود. به طور کلی، این مطالعه نشان داد که ترکیب نورهای LED و نانولوله های کربنی می تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود رشد و کارایی فتوسنتزی گل میمون استفاده شود. با این حال، انتخاب دقیق طیف نوری و غلظت نانولوله ها اهمیت زیادی دارد، زیرا غلظت های بالا (مانند ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) ممکن است اثرات منفی مانند کاهش محتوای کلروفیل یا استرس اکسیداتیو را به دنبال داشته باشد.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج این پژوهش، پیشنهاد می شود تحقیقات آینده روی مکانیسم های دقیق تعامل نانولوله های کربنی با فرآیند فتوسنتز، به ویژه نقش آن ها در انتقال انرژی و تأثیرشان بر فعالیت آنزیم های فتوسنتزی متمرکز شوند. همچنین، بررسی تأثیرات بلندمدت کاربرد نانولوله ها بر رشد، چرخه زندگی، و سلامت گیاهان زینتی می تواند به درک بهتر پتانسیل این فناوری کمک کند. علاوه بر این، مطالعه اثرات نانولوله ها در ترکیب با طیف های نوری مختلف و در گونه های دیگر گیاهان زینتی می تواند راه گشای توسعه روش های نوین در بهبود صفات زینتی و عملکردی این گیاهان باشد.



منابع

- Adams, S. R., Valdes, V. M., Langton, F. A. (2008). Why does low intensity, long-day lighting promote growth in petunia, impatiens, and tomato? *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 83(5), 609–615.
- Ahmadi, T., Shebani, L., Sabzealian, M. (2016). Investigating the effect of different LED light spectrums on growth indicators and rosmarinic acid content in *Melissa officinalis* L. *Journal of Plant Process and Function*, 6(21), 213–222. (In Persian)
- Arnon, D. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15.
- Bayat, L., Arab, M., AliNiyafard, S. (2018). The effectiveness of different light spectrums on inhibiting intense light stress in samurai roses. *Plant Process and Function*, 9(36), 93–103. (In Persian)
- Canas, J. E., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L. (2008). Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Nanomaterials in the Environment*, 27(9), 1922–1931.
- Cao, G., Zhang, G., Yu, J., Ma, Y. (2013). Effects of different LED light qualities on cucumber seedling growth and chlorophyll fluorescence parameters. *Scientia Agricultura Sinica*, 46(6), 1297–1304.
- Chia, P. L., Kubota, C. (2010). End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation. *Horticultural Science*, 45(10), 1501–1506.
- Ghasemi Ghasare, M., Kafi, M. (2011). *Scientific and practical floriculture*. Razavi Publishing. (In Persian)
- Heo, J. W., Kang, D. H., Bang, H. S., Hong, S. G., Chun, C. H., Kang, K. K. (2012). Early growth, pigmentation, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 30(1), 6–12.
- Hernández, R., Kubota, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 66–74.
- Heydarizadeh, P., Zahedi, M., Sabzealian, M. (2013). The effect of LED light on plant performance, percentage of essential oil and activity of antioxidant enzymes in peppermint (*Mentha piperita*). *Plant Process and Function*, 3(8), 13–24. (In Persian)
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45(12), 1809–1814.
- Jung, E. S., Lee, S., Lim, S. H., Ha, S. H., Liu, K. H., Lee, C. H. (2013). Metabolite profiling of the short-term responses of rice leaves (*Oryza sativa* cv. Ilmi) cultivated under different LED lights and its correlations with antioxidant activities. *Plant Science*, 210, 61–69.
- Khalili, M., Khangoli, S. (2019). The effect of LED light on morphological and physiological indices in *Marrubium vulgare* plant. *Journal of Ornamental Plants*, 9(2), 359–376. (In Persian)
- Khazaei, M., Rafii, F., Sabzealian, M., Smart, S. (2021). The effect of different LED light spectrums on the morphophysiological traits of three types of mint. *Journal of Horticultural Sciences of Iran*, 52(2), 461–471. (In Persian)



- Khodakovskaya, M. V., de Silva, K., Nedosekin, D. A., Dervishi, E., Biris, A. S., Shashkov, E. V., Zharov, V. P. (2013). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(2), 803–808.
- Khosravi Majdari, M., Torabi Gigloo, M., Chamani, E., Maleki Lajayer, H., Pourbeyrami Hir, Y., Ahadzadeh, M. (2024). Investigation on the effects of carbon nanotubes application on regeneration of *Rosmarinus officinalis* plants under in vitro conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 24(1), 95–110. (In Persian)
- Koksall, N., İncesu, M., Teke, A. (2015). Supplemental LED lighting increases pansy growth. *Horticultura Brasileira*, 33(4), 428–433.
- Kreslavski, V. D., Lyubimov, V. Y., Shirshikova, G. N., Shmarev, A. N., Kosobryukhov, A. A., Schmitt, F. J., Friedrich, T., Allakhverdiev, S. I. (2013). Preillumination of lettuce seedlings with red light enhances the resistance of photosynthetic apparatus to UV-A. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 122, 1–6.
- Lanoue, J., Leonardos, E. D., Grodzinski, B. (2018). Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science*, 9, 756.
- Li, W. Z., Wen, J. Z., Zhang, Y. F. (2005). Growth of carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Carbon*, 43(7), 1475–1483.
- Liu, J., Fan, S., Dai, H. (2006). Carbon nanotubes: Synthesis, properties, and applications. *Materials Today*, 9(12), 46–52.
- MahdaviFard, M., Rezajnejad, A. H., Mousavifard, S. (2016). Effect of light intensity on morphophysiological characteristics and flowering of African and French parsley in late cultivation. *Journal of Horticultural Sciences (Agricultural Sciences and Industries)*, 32(2), 311–325. (In Persian)
- Mani, R. (2015). The effects of LEDs on plants. *Maximum Yield*. Available at (visited 12 January 2018).
- Marie, A. (2017). Effects of light spectrum on carotenoid content in chrysanthemum. *Journal of Horticultural Studies*, 5(3), 123–130.
- Massa, G. D., Kim, H. H., Wheeler, R. M., Mitchell, C. A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43(7), 1951–1956.
- Miao, Y. X., Wang, X. Z., Gao, L. H., Chen, Q. Y., Qu, M. (2016). Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of photosystem II and I and photosynthetic electron transport capacity in cucumber leaves. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1), 87–100.
- Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947–1950.
- Noorbakhsh, S., Ahmadi, M. (2011). *Carbon nanotubes: Structure and applications*. Tehran University Press. (In Persian)
- Opara, E. C. (2004). Effects of nanomaterials on plant growth: A review. *Journal of Agricultural Nanotechnology*, 1(1), 12–18.
- Pezhohan, A., Jalali, G. A., Etbati, H., Zarafshar, M., Satarian, A. (2015). Comparison of carbon nanotube treatments with chemical and physical treatments for seed dormancy breaking in *Myrtus communis* L. *Plant Research Journal*, 29(2), 300–308. (In Persian)



- Pourbeyrami Hir, Y., Chamani, E., Ahadzadeh, M., Shaker, S., Nabipour Sanjbod, R. (2024). Investigation on the effects of carbon nanotubes and kinetin on growth and regeneration of *Salvia nemorosa* under in vitro conditions. *Journal of Horticultural Science*, 38(2), 353–366. (In Persian)
- Runkle, E. S., Heins, R. D. (2001). Specific functions of red, far red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(3), 275–282.
- Sage, L. C. (1992). *Pigment of the imagination: A history of phytochrome research*. Academic Press.
- Sing, A. (2010). Applications of nanotechnology in agriculture: A review. *Journal of Nanoscience and Agriculture*, 2(1), 34–40.
- Soltani, F., Hassanpour, H., Hekmati, M. (2021). Study of light spectrum effects on some growth parameters and antioxidant capacity of *Anthemis gilanica*. *Space Science and Technology*, 14(1), 15–22. (In Persian)
- Son, K. H., Oh, M. M. (2013). Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience*, 48(8), 988–995.
- Song, J. X., Meng, Q. W., Du, W. F., He, D. X. (2017). Effects of light quality on growth and development of cucumber seedlings in controlled environment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 312–318.
- Tajpileh, G., Mahmoudzadeh, A., Ishaghi, A. (2013). Investigating the effect of carbon nanotubes on the germination and growth characteristics of chicory plant (*Cichorium intybus* L.). *Proceedings of the Second National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture*, 1–12. (In Persian)
- Wang, G., Chen, Y., Fan, H., Huang, P. (2021). Effects of light-emitting diode (LED) red and blue light on the growth and photosynthetic characteristics of *Momordica charantia* L. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 10(1), 1–15.
- Yeh, N., Chung, J. P. (2009). High-brightness LEDs—energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2175–2180.





Effect of LED lights and elicitors on photosynthesis indices of snapdragon (*Antirrhinum majus*)

Sahar Sardari, Younes pourbeyrami Hir*, Esmaeil chamani

department of Horticulture Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, Iran

✉ Younes-ph62@uma.ac.ir

Received: Revised: Accptd:

Abstract:

Snapdragon (*Antirrhinum majus*) belongs to the *Plantaginaceae* family. While it is a perennial plant, it is often cultivated as an annual, especially in regions with cold winters. This study aimed to investigate the combined effects of different LED light spectra and carbon nanotube concentrations on the physiological characteristics of snapdragon plants. This experiment was conducted under controlled conditions using a CRD based factorial design with 4 replications. Treatments included various LED light combinations (white, blue, red, and their 80% blue light + 20% red light, 60% blue light + 40% red light, 40% blue light + 60% red light and 20% blue light + 80% red light combinations) and 3 concentrations of carbon nanotubes (control, 50 and 100 mg/liter). Evaluated parameters were chlorophyll content, stomatal conductivity, and chlorophyll fluorescence. Results indicated that both LED light spectra and carbon nanotubes, significantly influenced the growth and physiological responses of snapdragon plants. Specific findings include: LED light spectra had varying effects on chlorophyll content, stomatal conductance, and fluorescence. Generally, blue light enhanced vegetative growth, while red light influenced flowering and biomass accumulation. The combination of red and blue light often yielded optimal results. Carbon nanotubes, particularly at higher concentrations, affected stomatal conductance and fluorescence. Their interaction with light treatments further modulated plant responses. Chlorophyll content, a key indicator of photosynthetic efficiency, was significantly affected by both light and nanotube treatments. Stomatal conductance, which regulates gas exchange, was also influenced. Fluorescence measurements provided insights into the efficiency of light energy utilization in photosynthesis. Overall, this study demonstrated that the combination of LED lights and carbon nanotubes can be an efficient tool for manipulating plant growth and physiology. The optimal light spectrum and carbon nanotube concentration varied depending on the parameter being investigated. These findings contribute to a better understanding of the complex interactions between light, nanomaterials, and plant growth, and have potential applications in controlled environment agriculture and plant biotechnology.

Keywords: Carbon nanotubes, Chlorophyll, Fluorescence, LED lights, Stomatal Conductance.

