JSST
VOL.16 / ISSUE 3/ FALL 2023/ (NO. 57)
Print ISSN: 2008-4560 / Online ISSN: 2324-4516
DOI: 10.30699/JSST.2023.1412
Pages: 69-78 / Research Paper / Submit: 15 July 2022 / Accepted: 05 March 2023

Growth Mechanism of *Matricaria chamomilla* Plant Under Space Lighting System: Induction of Pigment Synthesis, Enzyme Defense System, and Antioxidant Metabolites

Halimeh Hassanpour

Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology Tehran, Iran

E-Mail: hassanpour@ari.ac.ir

Light is a vital factor for plant cultivation. LED lamps in different spectra have some advantages such as low heat production and energy requirement, and long lifespan, which was used for the first time to design plant growth chambers in closed culture systems and space research. In this research, impact of light spectrums was studied on the growth mechanisms through chlorophyll pigments, enzyme defense system, and antioxidant metabolite analyses. Seeds were cultivated in Murashige and Skoog medium and exposed to different light spectrums of white, red, blue, and red-blue. Then, the seedlings were harvested for growth and biochemical analyses after 4 weeks. Results showed that red-blue and blue lights induced the fresh weight, dry weight, root length, adventitious roots, chlorophyll content, protein, flavonoids and antioxidant enzymes of superoxide dismutase and catalase. Blue spectrum significantly decreased stem length and increased the relative water content. Moreover, the highest amount of hydrogen peroxide was observed in seedlings treated with red light. It seems that light spectra by changing the hydrogen peroxide level can regulate antioxidant enzyme activity and enhance antioxidant metabolites, and red-blue light may use as a suitable lighting spectrum for the design of M. chamomilla cultivation chamber in space research.

Keywords: Optical spectra, Matricaria chamomilla, Chlorophyll pigment, Hydrogen peroxide, Flavonoid

How to Cite this in article:

H. Hassanpour." Growth mechanism of Matricaria chamomilla plant under space lighting system: induction of pigment synthesis, enzyme defense system, and antioxidant metabolites," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 69-78, 2023 (in Persian).

JSST
دوره ۱۶ / شماره ۳/ پاییز ۱۴۰۲ / (پیاپی ۵۷)
شاپای چاپی: ۴۵۶۰- ۲۰۰۸ / شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۳۲۴
DOI: 10.30699/JSST.2023.1412
ص. ص. ۶۹- ۷۸ / مقاله علمی- پژوهشی / دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴ / پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

مکانیسم رشد گیاه بابونه آلمانی (*Matricaria Chamomilla*) تحت طیف‌های نوری: القای سنتز رنگیزه، سیستم دفاع آنزیمی و متابولیت‌های آنتی اکسیدانی

حلیمه حسن‌پور†

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

ایمیل: hassanpour@ari.ac.ir

نور یکی از فاکتورهای حیاتی برای رشد و نمو گیاه است. لامپ‌های ال‌ای‌دی با طیف‌های نوری مختلف دارای مزایایی نظیر تولید گرمای کم، نیازمندی به انرژی پایین و طول عمر بالا بوده که در سیستم‌های کشت بسته و تحقیقات فضایی برای افزایش تولید بیومس و متابولیت‌های ثانوی استفاده می‌شوند. در این پژوهش، اثر طیف‌های نوری بر مکانیسم رشد گیاه داروئی بابونه آلمانی با بررسی محتوای رنگیزه، سیستم دفاع آنزیمی و متابولیت‌های ثانوی ارزیابی شد. بذرها پس از کشت در محیط موراشیگ و اسکوگ، تحت طیف‌های سفید، قرمز، آبی و قرمز-آبی قرار گرفتند. گیاهچه‌ها بعد از ۴ هفته برداشت شده و تحت آنالیزهای رشد و بیوشیمیایی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نور قرمز-آبی سبب القای وزن تر، وزن خشک، طول ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی، محتوای کلروفیل، پروتئین، فلاونوئید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز شد. طیف آبی طول ساقه را کاهش و محتوای نسبی آب را افزایش داد. بالاترین مقدار هیدروژن پراکسید نیز در گیاهچه‌های تیمار شده با نور قرمز مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد طیف‌های نوری با تغییر سطح هیدروژن پراکسید در تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع متابولیت‌های ثانوی نقش دارند.

واژه‌های کلیدی: طیف‌های نوری، بابونه آلمانی، رنگیزه کلروفیل، هیدروژن پراکسید، فلاونوئید

علائم و اختصارات

سوپراکسید دیسموتاز	Superoxide dismutase (SOD)
کاتالاز	Catalase (CAT)
گونه‌های اکسیژن فعال	Reactive Oxygen Species (ROS)
وزن اشباع	Saturated Mass (SM)

مقدمه

گیاهان به‌عنوان عناصر کلیدی در سیستم پشتیبان حیات برای سفرهای فضایی هستند، زیرا با فتوسنتز می‌توانند مواد غذایی و اکسیژن را برای سفرهای طولانی مدت تأمین نمایند. سیستم‌های رشد گیاهان در ایستگاه‌های بین‌المللی فضایی نیازمند استفاده از منابع نوری مصنوعی برای رشد گیاه است. منابع نور سنتی نیاز به منبع انرژی بالا بوده و وزن

---

†. استادیار

زیادی را اشغال می‌کنند. هم‌چنین گرمای زیادی در محیط بسته ایجاد نموده و اثر بازدارندگی روی رشد ایجاد می‌کنند. بنابراین اولین بار در تحقیقات فضایی، چراغ‌های ال‌ای‌دی طراحی شدند که وزن کمی داشته و گرمای کمی را ایجاد می‌کردند. هم‌چنین نیاز به انرژی کمتری در سفرهای طولانی مدت نسبت به منابع نور سنتی داشتند [۱].

نور خورشید دارای طول موج‌های مختلف از ۳۰۰ تا ۲۶۰۰ نانومتر است، در حالی‌که طیف‌های مورد نیاز گیاه بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر هستند. طیف قرمز (۶۲۰-۷۰۰ نانومتر) و آبی (۴۲۰ تا ۵۰۰ نانومتر) نقش مهم‌تری را در فتوسنتز نسبت به طیف‌های دیگر ایفا می‌کنند [۲]. نور قرمز در رشد گیاه و تولید بیومس و نور آبی در پدیده نورگرایی و باز نگه داشتن روزنه‌ها نقش دارد و از طویل شدن ساقه نیز جلوگیری می‌کند [۳].

اخیراً توجه زیادی به تأثیر طیف‌های مختلف ال‌ای‌دی بر القای رشد گیاه در محیط‌های بسته شده است و این فرضیه وجود دارد که طیف‌های مختلف ال‌ای‌دی دارای اثرات متفاوتی بر سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی و کارایی فتوسنتز هستند [۴و۵]. برای مثال، طیف نوری آبی سبب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم روبیسکو، انتقال الکترون فتوسنتزی در گیاه کاهو و *Cucumis sativus* شد [۶ و۷]. نور قرمز سبب کاهش تثبیت دی‌اکسید کربن فتوسنتزی و تولید بیومس در گیاه فلفل شد [۵]. بیشترین رشد بافت کالوس در گیاه *Canavalia ensiformis* تحت نور قرمز-آبی نسبت به طیف‌های دیگر به‌دست آمد [۸]. در کشت سلول Artemisia نشان دادند که نور قرمز تولید متابولیت آرتمیزینین را تحریک نمود [۹]. تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت نور قرمز-آبی در بافت کالوس بذرالبنج مشبک نیز افزایش یافت [۴]. اما مکانیسم اثر طیف‌های نوری بر تولید بیومس و متابولیت‌های ثانوی نیاز به مطالعه بیشتر در گیاهان دارد.

بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla L.*)، گیاهی دارویی و متعلق به خانواده آستراسه است. این گیاه در آسیا، اروپا، و آمریکا گسترش دارد و در ایران نیز به‌صورت خودرو رویش دارد. از گل‌های گیاه در صنایع دارویی، غذایی و صنعتی استفاده شده و در طب سنتی به‌عنوان ضد اسپاسم، ضد درد، ضد قارچ، درمان اختلالات گوارشی و دردهای روماتیسمی به‌کار می‌رود [۱۰و ۱۱]. اخیراً نشان داده‌اند که عصاره گیاه بابونه دارای خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد التهابی، ضد سرطان، ضد میکروبی و ضد آلرژی است که به دلیل حضور ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی (از جمله آپی ژنین و آپی ژنین-۷-گلوکوزید) ارزشمند و دارویی موجود در عصاره گیاه است. بنابراین روش‌های بیوتکنولوژیکی و کشت درون شیشه می‌تواند به‌عنوان یکی از راه‌کارهای ارزشمند برای تولید پایدار متابولیت‌های دارویی این گیاه باشد. تاکنون مطالعات کمی در ارتباط با تأثیر اثر نور ال‌ای‌دی بر رشد، آسیب غشای سلولی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان دارویی انجام شده و در گیاه بابونه آلمانی نیز بررسی نشده است. از طرفی نشان داده‌اند که طیف‌های مختلف نوری، اثرات مختلفی بر تولید انواع اکسیژن فعال (ROS) درون سلولی دارند [۴]. سطح تجمع ROS می‌تواند سبب کنترل و تنظیم فرایندهای تقسیم سلولی و رشد شود و یا سبب القای آسیب اکسیداتیو سلولی گردد [۱۲]. بنابراین هدف از پژوهش حاضر بررسی مکانیسم طیف‌های مختلف نوری سفید، قرمز، آبی و قرمز-آبی بر رشد گیاهچه‌ها از طریق سنجش محتوای ROS و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌های ثانوی گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

کشت گیاهچه

بذرهای گیاه بابونه آلمانی از شرکت پاکان بذر اصفهان خریداری شد. بذرها در هیپوکلریت سدیم ۱۰٪ برای ۱۰ دقیقه قرار گرفته و پس از شستشو با آب مقطر برای مدت ۱ دقیقه در اتانول ۷۰٪ قرار گرفته و چند بار با آب مقطر استریل شستشو شدند. سپس بذرها در محیط ۱/۲ موراشیگ و اسکوگ کشت شدند. شیشه‌های کشت به اتاق کشت تحت طیف‌های مختلف نوری سفید (کنترل)، قرمز، آبی و قرمز-آبی (به ترتیب با نسبت ۳ به ۱) در شرایط نوری ۸/۱۶ (روشنایی/تاریکی) و دمای ۲ ± ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. گیاهچه‌ها پس از ۴ هفته برداشت شدند و تحت آنالیزهای مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی قرار گرفتند.

بررسی محتوای نسبی آب

وزن تر برگ‌ها بلافاصله پس از برداشت اندازه‌گیری شد. سپس وزن اشباع با قرارگیری برگ‌ها در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتیگراد و شرایط تاریکی اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری وزن اشباع، نمونه‌ها در آون ۴۵ درجه قرار گرفتند و وزن خشک محاسبه شد و با استفاده از روش Wheatherley محتوای نسبی آب با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید [۱۳].

محتوای نسبی آب = [(وزن تر − وزن خشک) / (وزن اشباع − وزن خشک)] × ۱۰۰

بررسی رنگیزه‌ها

ارزیابی رنگیزه‌های کلروفیل بر اساس روش Arnon و همکاران انجام شد [۱۴]. برگ‌ها (۰/۲ گرم) در استن ۸۰٪ هموژنیزه شدند و پس از سانتریفوژ جذب آن‌ها در ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر خوانده شد و محتوای رنگیزه‌های کلروفیل با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد [۱۵].

$$Chl\ a = 12.7\ A663 - 2.69\ A645 \quad (۱)$$

$$Chl\ b = 22.9\ A645 - 4.68\ A663 \quad (۲)$$

بررسی محتوای قند کل

محتوای قند کل با استفاده از روش فنل–سولفوریک اسید سنجش شد [۱۶]. برای تعیین مقدار قند کل، پودر خشک برگ (۰/۳ گرم) در ۳ میلی‌لیتر آب مقطر هموژن و سانتریفوژ (۵۰۰۰ دور برای ۵ دقیقه) شد. سپس یک میلی‌لیتر عصاره به ۰/۵ میلی‌لیتر فنل ۵٪ و ۲/۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۷٪ اضافه شد. جذب عصاره در ۴۸۵ نانومتر بعد از ۳۰ دقیقه خوانده شد و غلظت قند کل با استفاده از نمودار استاندارد گلوکز به‌دست آمد.

بررسی محتوای پراکسید هیدروژن

برگ‌های تازه (۰/۵ گرم) در محلول تری‌کلرواستیک اسید ۰/۱ (٪) هموژن شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات (۱۰ میلی‌مولار، pH 7) و یک میلی‌لیتر یدید پتاسیم (۱ مولار) اضافه شد. سپس جذب عصاره در ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و با استفاده از نمودار استاندارد پراکسید هیدروژن مقدار آن در هر نمونه به‌دست آمد [۱۷].

بررسی محتوای پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

برگ‌های تازه (۰/۱ گرم) در محلول Tris-HCl (۱ مولار، PH 8/6) و دمای ۴ درجه سائیده شد و از محلول رویی برای سنجش پروتئین و آنزیم‌ها استفاده شد. محتوای پروتئین با استفاده از روش برادفورد به‌دست آمد. بدین‌ترتیب که ۲/۵ میلی‌لیتر معرف برادفورد با ۵۰ میکرولیتر عصاره مخلوط و جذب آن در ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد و با کمک نمودار استاندارد آلبومن سرم گاوی غلظت پروتئین هر نمونه محاسبه شد [۱۸].

برای تعیین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، ۲۰۰ میکرولیتر از عصاره با نیتروبلوتترازولیوم (۷۵ میکرومولار)، EDTA (۰/۱ میلی‌مولار)، بافر پتاسیم فسفات (۵۰ میلی مولار)، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، ریبوفلاوین (۷۵ میلی‌مولار) مخلوط شده و جذب آن در ۵۶۰ نانومتر بعد از ۱۰ دقیقه محاسبه شد [۱۹]. در واحد آنزیمی سوپراکسید دیسموتاز، یک واحد آنزیمی بیان‌گر مقدار آنزیمی است که سبب ۵۰٪ بازدارندگی احیای نیتروبلوتترازولیوم می‌شود.

فعالیت آنزیم کاتالاز بر اساس روش Aebi (۱۹۸۴) محاسبه شد. ۱۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به ۶۰۰ میکرولیتر بافر پتاسیم فسفات (۵۰ میلی‌مولار، pH 7) و ۷۵ میکرولیتر H_2O_2 (۳٪) اضافه شد و فعالیت آن در ۲۴۰ نانومتر محاسبه شد [۲۰].

بررسی محتوای فلاونوئید

سنجش فلاونوئید با روش Hatamnia و همکاران (۲۰۱۴) انجام خواهد شد. ۵۰۰ میکرولیتر عصاره با آلومینیوم کلرید ۱۰٪، استات پتاسیم ۱ مولار و ۲/۵ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و جذب آن در ۵۱۸ نانومتر خوانده خواهد شد. از روتین نیز به عنوان استاندارد استفاده شد [۲۱].

آنالیز آماری

آنالیز آماری با روش ANOVA توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد. آزمایش‌های رشد با ۵ تکرار و آزمایش‌های بیوشیمیایی با ۳ تکرار برای هر تیمار انجام شد. اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها با روش LSD در سطح $P \leq ۰/۰۵$ صورت گرفت.

نتایج

تأثیر طیف‌های نوری بر پارامترهای رشد

پارامترهای مختلف رشد افزایش معنی‌داری را تحت طیف‌های مختلف نوری نشان دادند. بیشترین میزان وزن تر، وزن خشک و تعداد ریشه‌های جانبی تحت تیمارهای آبی و قرمز–آبی مشاهده شد (جدول ۱). محتوای نسبی آب نیز معنی‌داری یافت و طیف نور آبی سبب بیشترین میزان افزایش (۴۹/۰۲ ٪) محتوای آبی نسبت به تیمار شاهد (نور سفید) شد. بیشترین طول ساقه و ریشه در تیمارهای قرمز–آبی و قرمز مشاهده شد و تیمار قرمز–آبی سبب افزایش ۷۵ درصدی طول ساقه و ۹۲ درصدی طول ریشه نسبت به شاهد شد.

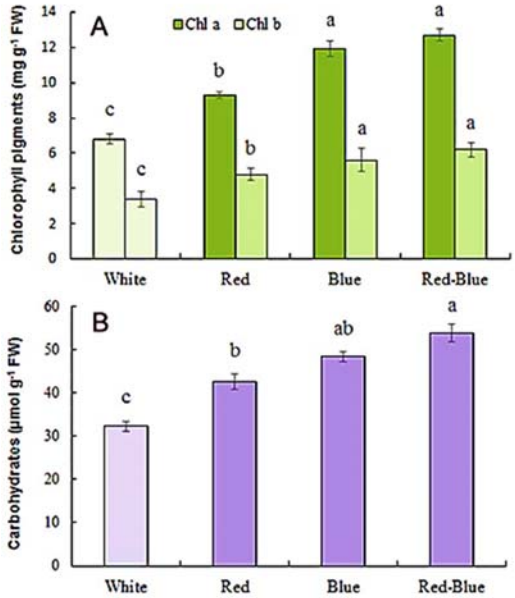
جدول ۱- تأثیر طیف‌های مختلف نوری بر برخی از پارامترهای رشد گیاه بابونه آلمانی.

حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است.

شاخص‌های رشد	طیف‌های نوری			
	سفید	قرمز	آبی	قرمز– آبی
وزن تر (گرم)	۰/۰۶۵ ± ۰/۰۰۲۱ c	۰/۰۹۹ ± ۰/۰۰۳۳ b	۰/۱۱۹ ± ۰/۰۰۲۴ a	۰/۱۲۲ ± ۰/۰۰۳۶ a
وزن خشک (گرم)	۰/۰۰۵۲ ± ۰/۰۰۰۲۷ c	۰/۰۰۸۹ ± ۰/۰۰۰۳۳ b	۰/۰۱۰ ± ۰/۰۰۰۲۹ a	۰/۰۱۱ ± ۰/۰۰۰۳۱ a
محتوای نسبی آب	۶۱/۴ ± ۱/۹۸ c	۷۸/۱ ± ۲/۲۸ b	۹۱/۵ ± ۳/۴۵ a	۸۳/۶ ± ۲/۳۹ ab
طول ساقه (سانتی‌متر)	۲/۴ ± ۰/۳۱ b	۳/۷ ± ۰/۱۸ ab	۲/۱ ± ۰/۳۴ b	۴/۲ ± ۰/۲۸ a
طول ریشه (سانتی‌متر)	۲/۵ ± ۰/۱۴۴ cd	۴/۲ ± ۰/۲۳۲ b	۳/۲ ± ۰/۳۵۱ c	۴/۸ ± ۰/۱۸۶ a
تعداد ریشه‌های جانبی	۲/۷ ± ۰/۲۲ b	۳/۲ ± ۰/۱۷ b	۶/۴ ± ۰/۱۹ a	۶/۷ ± ۰/۲۸ a

تأثیر طیف‌های نوری بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و کربوهیدرات‌ها

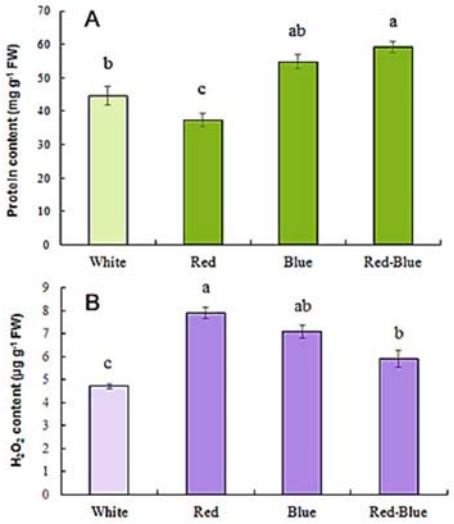
محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت طیف‌های نوری افزایش معنی‌داری یافت. به‌طوری‌که طیف‌های آبی و قرمز-آبی بیشترین مقدار کلروفیل a و b را در مقایسه با گیاهچه‌های شاهد نشان دادند و تفاوت معنی‌داری بین این دو طیف از نظر محتوای رنگیره مشاهده نشد (شکل ۱-A) از طرفی طیف قرمز-آبی سبب تجمع بیشترین محتوای کربوهیدرات شد و افزایش ۶۶/۸۷ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد. به‌نظر می‌رسد تجمع کربوهیدرات‌ها در ارتباط با سنتز رنگیزه‌ها تحت طیف‌های نوری باشد (شکل ۱-B)



شکل ۱- تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر محتوای رنگیزه کلروفیل (A) و کربوهیدرات‌ها (B) .حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح P ≤۰/۰۵ است.

تأثیر طیف‌های نوری بر محتوای پروتئین و هیدروژن پراکسید

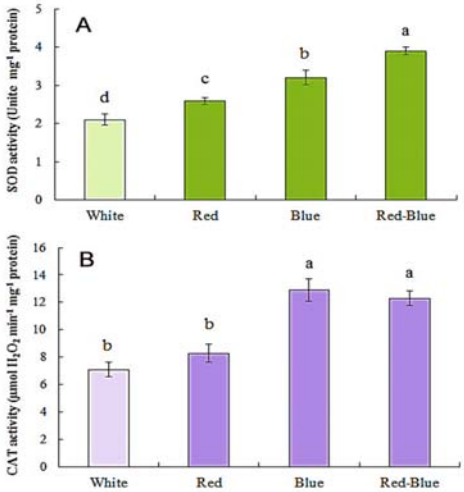
محتوای پروتئین‌های محلول تحت طیف‌های نوری تغییر معنی‌داری یافت. طیف‌های قرمز-آبی و آبی سبب افزایش محتوای پروتئین و طیف قرمز محتوای پروتئینی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (شکل ۲-A) طیف قرمز-آبی سبب افزایش ۳۲/۹ درصدی محتوای پروتئین نسبت به شاهد شد. محتوای هیدروژن پراکسید (H_2O_2) تحت طیف‌های مختلف افزایش یافت (شکل۲-B) بیشترین محتوای H_2O_2 در تیمار قرمز مشاهده شد و سبب افزایش ۶۸/۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد شد.



شکل ۲- تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر محتوای پروتئین (A) و هیدروژن پراکسید (B). حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است.تأثیر طیف‌های نوری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

تأثیر طیف‌های نوری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

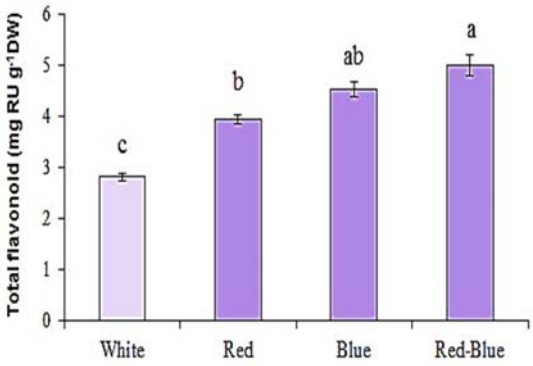
فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت طیف‌های مختلف نوری تغییر یافت. طیف‌های آبی و قرمز-آبی سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز شدند (شکل ۳). از طرفی، افزایش کمتر فعالیت این دو آنزیم با طیف قرمز مشاهده شد که برای آنزیم کاتالاز معنی‌دار نبود. بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز به ترتیب تحت تیمارهای قرمز-آبی و آبی مشاهده شد که طیف نوری قرمز-آبی افزایش ۸۵/۷ و ۷۳/۲ درصدی را نسبت به تیمار شاهد نشان داد.



شکل ۳- تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسیددیسموتاز (SOD; A) و کاتالاز (CAT; B). حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است.

تأثیر طیف‌های نوری بر محتوای فلاونوئید کل

محتوای فلاونوئید تحت طیف‌های مختلف نوری افزایش معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان داد و بیشترین مقدار در طیف قرمز-آبی و سپس در طیف آبی مشاهده شد (شکل ۴). طیف قرمز-آبی منجر به افزایش ۷۶/۹ درصدی محتوای فلاونوئید در مقایسه با تیمار شاهد شد.



شکل ۴- تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر محتوای فلاونوئید کل. حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است.

بحث

نور به‌عنوان یکی از فاکتورهای مهم تأمین انرژی برای رشد و نمو گیاه است. نور می‌تواند بر حالت ردوکس سلول‌ها تأثیر گذارد و باعث فعال‌سازی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی شود. در این پژوهش، طیف‌های آبی و قرمز-آبی سبب افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک و ریشه‌زایی گیاهچه‌های بابونه در شرایط درون شیشه شدند. طیف آبی اثر منفی بر طول ساقه داشت و طیف قرمز نیز اثر افزایشی کمتر رشد را در مقایسه با طیف‌های قرمز-آبی و آبی نشان داد. تفاوت پاسخ‌های رشد می‌تواند در ارتباط با اثرات مختلف سیگنالینگ طیف‌ها بر تقسیم، تمایز و حالت متابولیکی سلول‌ها باشد [۴]. تاکنون اثرات مختلف تأثیر طیف‌های نوری بر رشد گیاهان گزارش شده است. برای مثال، نور قرمز سبب کاهش تثبیت دی‌اکسیدکربن و تولید بیومس در گیاه فلفل شد [۵]. در کاهو تیمار نور آبی سبب افزایش فعالیت روبیسکو و انتقال الکترون فتوسنتزی شد [۶]. بیشترین مقدار بیومس در بافت کالوس گیاه *Canavalia ensiformis* در طیف نوری قرمز-آبی به‌دست آمد [۸]. به‌علاوه نور زرد نیز سبب افزایش رشد گیاه *Panax vietnamensis* شد [۲۲]. تفاوت در پاسخ‌های رشد می‌تواند در ارتباط با ژنتیک گیاه، تجمع رادیکال‌های آزاد و هم‌چنین شدت و کیفیت نور باشد [۲۳] می‌توان پیشنهاد نمود که کاهش رشد گیاهچه‌های بابونه تحت نور قرمز می‌تواند در ارتباط با افزایش سطح تجمع رادیکال‌های آزاد باشد که با نتایج حاصل از این تحقیق هم‌خوانی دارد.

محتوای نسبی آب در گیاهچه‌های تیمار شده با نور آبی به نسبت بالایی افزایش یافت. تحقیقات نشان داد که طیف قرمز-آبی سبب تحریک رشد و محتوای نسبی آب در گیاه بابونه گیلانی شد [۲۴] با توجه به نتایج حاصله از این پژوهش، افزایش رشد تحت تیمارهای قرمز-آبی و آبی می‌تواند در ارتباط با افزایش تعداد ریشه‌ها و جذب بیشتر آب و مواد غذایی باشد.

گیاهان به شدت و کیفیت نور حساس‌اند و از طریق گیرنده‌های نوری سیگنال نوری را دریافت می‌کنند. تاکنون هشت رسپتور نوری شناسایی شده است که سه تای آن‌ها در دریافت نور آبی و پنج‌تای آن‌ها فیتوکروم‌ها هستند [۲۵]. طول موج‌های مختلف توسط رسپتورهای نوری مختلف در گیاهان دریافت شده و به‌طور متفاوتی روی سنتز رنگیزه‌ها تأثیر می‌گذارند و در پی آن بر حالت جذب نوری کلروفیل نیز اثر دارند. در این پژوهش طیف‌های آبی و قرمز-آبی سبب القای بیشتر سنتز کلروفیل و تجمع کربوهیدرات در گیاهچه‌های بابونه آلمانی در مقایسه با طیف قرمز و سفید (شاهد) شد. نور آبی نقش مهمی در سنتز کلروفیل داشته و در شرایط درون شیشه سبب القای سنتز کلروفیل می‌شود [۲۶]. به‌نظر می‌رسد تفاوت پاسخ سنتز کلروفیل و مقدار کربوهیدرات می‌تواند در ارتباط با پاسخ متفاوت رسپتورهای نوری به طیف‌های مختلف در گیاه بابونه باشد.

محتوای پروتئین پاسخ‌های متفاوتی را نسبت به طیف‌های مختلف نشان داد. به‌طوری‌که محتوای آن در طیف قرمز کاهش یافت، ولی در طیف آبی و قرمز-آبی افزایش را نشان داد. آنزیم‌ها ساختار پروتئینی دارند و سطح پروتئین کل می‌تواند بیان‌گر حالت فعال زیستی سلول باشد. در واقع کیفیت نورهای مختلف می‌تواند روی ترجمه پروتئین از mRNA، پایداری، ذخیره و یا حتی تخریب ساختار آن‌ها تأثیر بگذارد [۲۷]. طیف‌های نوری می‌توانند با تولید و تجمع ROS روی محتوای پروتئین‌ها تأثیر داشته باشند. در این پژوهش بیشترین محتوای H_2O_2 و کمترین مقدار پروتئین در گیاهچه‌های تیمار شده با طیف قرمز مشاهده شد. ترکیبات ROS در سطوح پایین می‌تواند به‌عنوان ملکول‌های سیگنالینگ عمل نموده و در تنظیم بیان ژن‌ها و فعالیت آنزیم‌ها نقش داشته باشند و در مقادیر بالا اثر تخریبی را روی ماکروملکول‌هایی نظیر پروتئین، DNA، لیپیدها و غیره نشان دهند [۲۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که محتوای پروتئینی گیاهچه‌ها تحت طیف‌های نوری در ارتباط منفی با سطح رادیکال‌های آزاد درون سلولی است.

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نقش مهمی در از بین بردن ترکیبات ROS دارند و از آسیب سلولی جلوگیری می‌کنند. شرایط نامساعد و تنش می‌تواند سبب غیرفعال‌سازی و یا تخریب این آنزیم‌ها شده و بر

تقسیم سلولی و رشد تأثیر گذارد. آنزیم‌های مهارکننده رادیکال‌های آزاد نظیر سوپراکسید دیسموتاز، اسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز در بخش‌های مختلف سلولی قرار داشته و در از بین بردن رادیکال‌های آزاد و کاهش آسیب سلولی نقش ایفا می‌کنند. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در اولین خط دفاعی سلول بوده و رادیکال‌های سوپراکسید را به آب و H_2O_2 تبدیل می‌کند و سپس توسط دیگر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز جاروب می‌شود [۲۹]. در این پژوهش، فعالیت بالای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت طیف‌های نوری قرمز-آبی و آبی بیانگر پتانسیل بالای سلول‌ها در از بین بردن رادیکال‌های سوپراکسید بوده و در پی آن H_2O_2 تولید شده توسط آنزیم کاتالاز جاروب می‌شود [۳۰]. تفاوت در فعالیت آنزیم‌ها بیانگر سطح تنش اکسیداتیو ایجاد شده توسط ترکیبات ROS درون سلولی است. سمیت ایجاد توسط ROS بستگی به سطح تجمع آن در سلول‌ها دارد [۳۱]. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش رشد گیاهچه‌ها تحت طیف‌های آبی و قرمز-آبی می‌تواند در ارتباط با افزایش بیشتر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برای جاروب کردن ترکیبات ROS در این طیف‌ها بوده که با نتایج مقدار H_2O_2 تجمع یافته در تیمارهای مختلف نوری در این تحقیق هم‌خوانی دارد.

علاوه بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، سلول‌های گیاهی حاوی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی بوده که در جاروب نمودن رادیکال‌های ROS نقش مهمی دارند. در این پژوهش بیشترین محتوای فلاونوئیدی در تیمار قرمز-آبی و در پی آن طیف آبی در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده شد. ارتباط مثبت بین متابولیسم ثانویه و فرایندهای سیستم دفاعی در تحقیقات زیادی گزارش شده است [۳۱]. تنش اکسیداتیو ایجاد شده با طیف‌های نوری می‌تواند مشابه نوعی سیگنال عمل نموده و سبب افزایش مکانیسم دفاعی از طریق تغییر متابولیت‌های ثانوی نظیر ترکیبات فنلیک و فلاونوئید گردد که نقش مهمی را در جاروب نمودن ترکیبات ROS و بازدارندگی سیستم‌های آنزیمی تولید کننده ROS دارند [۴]. به‌نظر می‌رسد کاهش محتوای H_2O_2 تحت طیف قرمز-آبی در ارتباط با تنظیم سطح این ترکیبات توسط ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فعال شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باشد.

نتیجه‌گیری

طیف‌های نوری ال‌ای‌دی پاسخ‌های متفاوت فیزیولوژیکی و سیستم دفاعی سلولی را نشان دادند. طیف‌های نوری آبی و قرمز-آبی سبب افزایش پارامترهای رشد گیاهچه‌های بابونه آلمانی شدند. نور آبی منجر به تحریک رشد و افزایش محتوای آبی شد، ولی طول ساقه را کاهش داد. افزایش رشد در ارتباط با فعالیت آنزیم‌های اکسیدانی و تجمع تولید متابولیت‌های آنتی‌اکسیدانی فلاونوئیدی بود. طیف قرمز رشد گیاهچه‌ها را کمتر از طیف‌های آبی و قرمز-آبی افزایش داد که در ارتباط با افزایش قابل‌توجه H_2O_2 و آسیب اکسیداتیو بود و در پی آن نیز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز فعالیت کمی را نشان دادند. بررسی اثر این طیف‌ها بر بیان ژن‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و آنزیم‌های مسیر بیوسنتز متابولیت‌های ثانوی در این گیاه نیاز به مطالعه بیشتر در آینده دارد.

تشکر و قدردانی

مقاله حاصل پروژه مستقل "بررسی اثر طیف‌های مختلف نور LED بر رشد و تکثیر سلول‌های گیاهی در راستای طراحی اتاقک‌های رشد گیاه در مطالعات فضایی" است و از مسئولین محترم پژوهشگاه هوافضا قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] G. D. Massa, J. C. Emmerich, R. C. Morrow, C. M. Bourget, and C. A. Mitchell, "Plant-growth lighting for space life support: a review," *Gravitational and space biology*, vol. 19, no. 2, pp. 19-30, 2006.

[2] J. Long, M. Pu, Z. Huang, J. Li, and Z. Xu, "Research progress of spectral regulation of plant growth and development," *China Illuminating Engineering Journal*, vol. 29, pp. 8-16, 2018.

[3] He, L. Qin, E. L. Chong, T.-W. Choong, and S. K. Lee, "Plant growth and photosynthetic characteristics of Mesembryanthemum crystallinum grown aeroponically under different blue-and red-LEDs," *Frontiers in plant science*, vol. 8, p. 361, 2017.

[4] H. Hassanpour, "Potential impact of red-blue LED light on callus growth, cell viability, and secondary metabolism of Hyoscyamus reticulatus," *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, vol. 58, no. 2, pp. 256-265, 2022.

[5] C. S. Brown, A. C. Schuerger, and J. C. Sager, "Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting," *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 120, no. 5, pp. 808-813, 1995.

[6] X.-l. Chen, Q.-c. Yang, W.-p. Song, L.-c. Wang, W.-z. Guo, and X.-z. Xue, "Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation," *Scientia Horticulturae*, vol. 223, pp. 44-52, 2017.

[7] X. Wang, X. Xu, and J. Cui, "The importance of blue light for leaf area expansion, development of photosynthetic apparatus, and chloroplast ultrastructure of Cucumis sativus grown under weak light," *Photosynthetica*, vol. 53, no. 2, pp. 213-222, 2015.

[8] J. F. Saldarriaga, Y. Cruz, and J. E. López, "Preliminary study of the production of metabolites from in vitro cultures of C. ensiformis," *BMC biotechnology*, vol. 20, no. 1, pp. 1-11, 2020.

[9] Y. Wang, H. Zhang, B. Zhao, and X. Yuan, "Improved growth of Artemisia annua L hairy roots and artemisinin production under red light conditions," *Biotechnology letters*, vol. 23, pp. 1971-1973, 2001.

[10] H. Hassanpour and V. Niknam, "Establishment and assessment of cell suspension cultures of Matricaria chamomilla as a possible source of apigenin under static magnetic field," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 142, no. 3, pp. 583-593, 2020.

[11] M. Zemestani, M. Rafraf, and M. Asghari-Jafarabadi, "Chamomile tea improves glycemic indices and antioxidants status in patients with type 2 diabetes mellitus," *Nutrition*, vol. 32, no. 1, pp. 66-72, 2016.

[12] M. J. Merati, V. Niknam, H. Hassanpour, and M. Mirmasoumi, "Comparative effects of salt stress on growth and antioxidative responses in different organs of pennyroyal (Mentha pulegium L.)," *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, vol. 28, no. 5, pp. 1097-1107, 2016 (in Persain).

[13] P. Wheatherley, "Studies in the water relations of cotton plants. I. The field measurement of water deficit in leaves," *New Phytol*, vol. 49, pp. 81-87, 1950.

[14] D. I. Arnon, "Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris," *Plant physiology*, vol. 24, no. 1, p. 1, 1949.

[15] H. K. Lichtenthaler, "[34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes," *in Methods in enzymology*, vol. 148: Elsevier, pp. 350-382, 1987.

[16] M. DuBois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. t. Rebers, and F. Smith, "Colorimetric method for determination of sugars and related substances," *Analytical chemistry*, vol. 28, no. 3, pp. 350-356, 1956.

[17] V. Velikova, I. Yordanov, and A. Edreva, "Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines," *Plant science*, vol. 151, no. 1, pp. 59-66, 2000.

[18] M. M. Bradford, "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding," *Analytical biochemistry*, vol. 72, no. 1-2, pp. 248-254, 1976.

[19] C. N. Giannopolitis and S. K. Ries, "Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings," *Plant physiology*, vol. 59, no. 2, pp. 315-318, 1977.

[20] H. Aebi. "Catalase in vitro." In *Methods in enzymology*." vol. 105, pp. 121-126. Academic press, 1984.

[21] A. A. Hatamnia, N. Abbaspour, and R. Darvishzadeh, "Antioxidant activity and phenolic profile of different parts of Bene (Pistacia atlantica subsp. kurdica) fruits," *Food chemistry*, vol. 145, pp. 306-311, 2014.

[22] D. T. Nhut, T. Takamura, H. Watanabe, K. Okamoto, and M. Tanaka, "Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs)," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 73, pp. 43-52, 2003.

[23] M. Johkan, K. Shoji, F. Goto, S.-n. Hashida, and T. Yoshihara, "Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce," *HortScience*, vol. 45, no. 12, pp. 1809-1814, 2010.

[24] F. Soltani, H. Hassanpour, and M. Hekmati, "Study of light spectrums effects on some growth parameters and antioxidant capacity of Anthemis gilanica," *Space Science and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, 2021(in Persiqan).

[25] W. R. Briggs and M. A. Olney, "Photoreceptors in plant photomorphogenesis to date. Five phytochromes, two cryptochromes, one phototropin, and one superchrome," *Plant physiology*, vol. 125, no. 1, pp. 85-88, 2001.

[26] P. R. Poudel, I. Kataoka, and R. Mochioka, "Effect of red-and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes," *Plant cell, tissue and organ culture*, vol. 92, pp. 147-153, 2008.

[27] E. Petrillo, M. A. Godoy Herz, A. Barta, M. Kalyna, and A. R. Kornblihtt, "Let there be light: regulation of gene expression in plants," *RNA biology*, vol. 11, no. 10, pp. 1215-1220, 2014.

[28] A. Ashouri Sheikhi, H. Hassanpour, P. Jonoubi, M. Ghorbani Nohooji, and M. Nadimifar, "The Effect of Gamma Irradiation on In vitro Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Ferula gummosa Bioss," *Journal of Medicinal Plants*, vol. 15, no. 59, pp. 122-131, 2016(in Persian).

[29] H. Hassanpour, V. Niknam, and B. S. Haddadi, "High-frequency vibration improve callus growth via antioxidant enzymes induction in Hyoscyamus kurdicus," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 128, pp. 231-241, 2017.

[30] A. Shohael, M. Ali, K. Yu, E. Hahn, R. Islam, and K. Paek, "Effect of light on oxidative stress, secondary metabolites and induction of antioxidant enzymes in Eleutherococcus senticosus somatic embryos in bioreactor,"

Process Biochemistry, vol. 41, no. 5, pp. 1179-1185, 2006.

[31] S. Chen, Z. Vaghchhipawala, W. Li, H. Asard, and M. B. Dickman, "Tomato phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase inhibits cell death induced by Bax and oxidative stresses in yeast and plants," *Plant Physiology*, vol. 135, no. 3, pp. 1630-1641, 2004.

[32] M. E. Maffei, "Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution," *Frontiers in plant science*, vol. 5, p. 445, 2014.

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)