

طراحی سیستم نوری برای تحقیقات گیاهان در فضا

حلیمه حسن پور 

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

نویسنده مخاطب: hassanpour@ari.ac.ir

نور به عنوان یک از فاکتورهای محیطی موثر بر رشد گیاه است. تاکنون از منابع نوری مختلفی برای کشت گیاهان در سیستم‌های بسته و مطالعات فضایی استفاده شده است. منابع نوری سنتی دارای مشکلاتی بوده که برای تحقیقات فضایی مناسب نیستند. بزرگترین مشکل آنها نیازمندی به منبع انرژی بالا، وزن زیاد منابع تغذیه و تولید گرمای زیاد است. اولین بار طیف‌های نوری ال‌ای‌دی برای رفع مشکلات کشت گیاه در تحقیقات فضایی طراحی شد و امروزه در تحقیقات زمینی نظیر گل‌خانه‌ها و اتاق‌های کشت گیاه استفاده می‌شود. طیف‌های ال‌ای‌دی رنگ‌های مختلفی دارند، ولی نیاز به مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین نیاز گیاهان به این طیف‌هاست. در این مطالعه تکنولوژی نوری ال‌ای‌دی، تاثیر طیف‌ها بر رشد، تولید متابولیت و گیرنده‌های نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌های ال‌ای‌دی، تحقیقات فضایی، گیاهان، گیرنده‌های نوری

Designing an Optical System for Plant Research in Space

H. Hassanpour 

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

Corresponding Author: hassanpour@ari.ac.ir

Light is as an environmental factor affecting plant growth. So far, various light sources have been used to grow plants in closed systems and space studies. Traditional light sources have some problems and are not suitable for space research. The biggest problem of them is the need for the high energy source, power supply weight, and heat production. LED light spectra were designed to solve plant cultivation problems in space for the first time and are recently used in terrestrial research such as greenhouses and plant cultivation rooms. The LED spectra have different colors, but laboratory studies are needed to determine the plants' involvement for these spectra. In this study, LED light technology, effect of spectra on the growth, production of metabolites and optical receptors are investigated.

Keywords: LED spectra, Space research, Plants, Light receptors



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

How to Cite this in Article:

H. Hassanpour, " Designing an Optical System for Plant Research in Space," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 51-58, 2024 (in Persian).

۱ مقدمه

گیاهان به عنوان یکی از سلسله‌های اصلی موجودات زنده در کره زمین هستند که در طی فرایند فتوسنتز، انرژی نورانی خورشید را به صورت انرژی شیمیایی در مواد غذایی ذخیره می‌کنند. بدون گیاهان، زندگی روی کره زمین ممکن نیست و گیاهان در تامین نیازهای غذایی، دارویی، لباس و پالایش هوا نقش دارند [۱].

در مطالعات فضایی، گیاهان به عنوان عناصر کلیدی سیستم پشتیبان حیات هستند و با فتوسنتز می‌توانند مواد غذایی و اکسیژن را برای سفرهای طولانی مدت تامین نمایند. بطوریکه در ایستگاه بین‌المللی فضایی، گیاهان اکسیژن محیط را برای سفرهای طولانی مدت تامین نموده و نیز به عنوان غذا استفاده شوند. سیستم‌های رشد گیاهان در ایستگاه‌های بین‌المللی فضایی نیازمند استفاده از منابع نوری مصنوعی برای رشد گیاه است. از نظر اقتصادی و تولید پایدار محصولات کشاورزی، فناوری‌هایی نظیر دیودهای ساطع کننده نور (ال‌ای‌دی) ضرورت داشته و نیازمند توسعه دانش فنی است. البته طول موج و شدت طیف‌های نور ال‌ای‌دی بایستی با نیازهای فتوسنتزی گیاهان سازگار باشد [۲].

کشت گیاه در ایستگاه بین‌المللی با هدف باغبانی فضایی نیاز به طراحی تجهیزات رشد گیاهی داشته و بایستی مجهز به سیستم نوری برای کشت گیاه باشد. برای نمونه، اتاقک رشد گیاهی اوسیس در مأموریت‌های ایستگاه فضایی سالیوت طراحی شد که در آن از نور فلورسنت برای گیاهچه‌های نخود؛ تره فرنگی^۲ و کتان^۳ استفاده شد. این سیستم نوری برای گیاهچه‌ها مناسب نبود و کاهش رشد مشاهده شد [۳].

در مأموریت شاتل فضایی STS-3، واحدهای رشد گیاهی طراحی شد که هدف آن بررسی فرآیند رشد گیاهچه‌ها بود. هر واحد رشد گیاهی حاوی شش اتاقک رشد و سیستم پشتیبانی کننده رشد گیاه بود. سیستم روشنایی استفاده شده لامپ‌های فلورسنت بود که با یک زمان سنج کنترل شده و دمای محیط توسط فن‌ها و گرم‌کننده‌ها تنظیم می‌گردید [۴]. سیستم‌های نوری سنتی دارای معایبی از جمله نیازمندی به انرژی بالا و وزن زیاد در پرتاب‌های فضایی بوده و گرمای زیادی نیز ایجاد می‌نمایند. در حالیکه، نور ال‌ای‌دی در طیف‌های خاص مورد نیاز کشت گیاه، نیازمند منبع انرژی

پایین‌تری بوده، وزن زیادی ندارند و گرمای کمی را در محیط بسته ایجاد می‌نمایند. در ابتدای کار مطالعات فضایی، سیستم‌های کشت گیاهی طراحی شده ساختار ساده‌ای داشتند و سپس در طی پروازهای متمادی توسعه یافته‌تر شدند. بررسی این سیستم‌ها از نظر شکل ظاهری، سیستم نوری، گردش غذایی، سیستم تهویه و دما از اهمیت بسزایی برخوردار است [۲].

فناوری نور ال‌ای‌دی نشان داده است که می‌تواند بر رشد و تولید ترکیبات فعال زیستی گیاه دارد. بعلاوه می‌تواند سبب بهینه سازی ارزش غذایی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه در برابر تنش‌های محیطی شود. بسیاری از این متابولیت‌های دارای خواص ارزشمندی از جمله افزایش سیستم ایمنی، ضد میکروبی و ضد قارچی هستند. بعلاوه، استفاده از طیف‌های ال‌ای‌دی حتی می‌تواند پس از برداشت گیاه، عمر مفید محصولات غذایی را طولانی‌تر نموده، پیری را به تاخیر بیندازد و در نتیجه ضایعات محصولات غذایی را کاهش دهد [۵]. با توجه به اینکه مطالعه گیاهان در ایستگاه فضایی بین‌المللی نیاز به سیستم روشنایی برای رشد گیاه دارند، استفاده از لامپ‌های ال‌ای‌دی بدلیل نیازمندی به انرژی پایین و تولید گرمای کم می‌تواند بسیار کارآمد باشد و در ساخت ماژول‌های گیاهی فضایی از آن استفاده شود. اما اثر این طیف‌ها بایستی بر رشد، مورفولوژی گیاه و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. از اینرو ساختار این لامپ‌ها و تاثیر طیف‌های مختلف بر رشد، تمایز کلروپلاست و محتوای متابولیت‌های ثانوی مورد مطالعه قرار گرفته و طیف‌های کارآمد بر رشد گیاه در مطالعات فضایی معرفی خواهد شد.

۲ تکنولوژی نور ال‌ای‌دی

لامپ ال‌ای‌دی نوعی دیود نیمه‌هادی به حالت جامد است که اجازه می‌دهد جریان یک طرفه از آند به کاتد در محدوده ولتاژ خاصی هدایت شود. دیود از دو ماده متفاوت در کنار هم تشکیل شده است که به طور مشترک یک پیوند ناهمگن را تشکیل می‌دهند که در آن در یک سمت منافذ حاوی بار مثبت و سمت دیگر حاوی بار منفی (الکترون) است. هنگامی که یک ولتاژ رو به جلو مثبت اعمال می‌شود، جریان از سمت p به سمت دیگر (n) حرکت می‌کند، ولی الکترون‌ها برعکس جهت جریان حرکت کنند. هنگامی که الکترون از منافذ عبور می‌کند، در

3. *Linum usitatissimum*

1. *Cicer arietinum*
2. *Allium porrum*

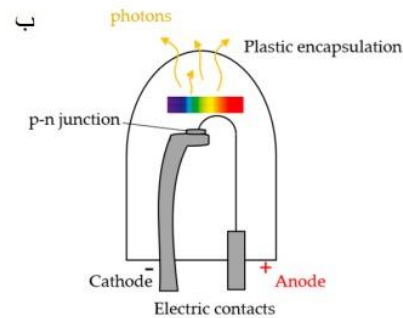
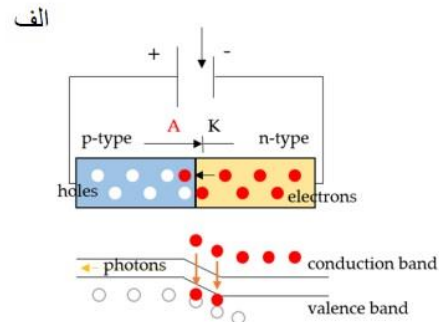
معمولاً در گلخانه‌ها و اتاق‌های رشد استفاده می‌گردیدند. لامپ‌های متال هالید برای جایگزینی کامل نور خورشید یا تکمیل بخشی از آن در زمان‌های کم تابش خورشید استفاده می‌شد. طراحی قفسه‌های نوری با لامپ‌های هالید متال می‌تواند طیف تابش ساطع شده را بهینه نماید [۸].

لامپ‌های تخلیه با شدت بالا دارای معایبی از جمله نیاز انرژی بالا، حجم حجیم و انتشار گرما هستند و نمی‌توان از آنها در نزدیکی گیاه و برگ‌ها استفاده نمود. در شمال از این لامپ‌ها برای ایجاد گرما و کنترل دمایی استفاده می‌شد. این لامپ‌ها دارای خطراتی نظیر وجود گاز تحت فشار در ساختارشان هستند. بعلاوه طیف این لامپ‌ها دارای بخش زیاد سبز- زرد، مقدار قابل توجهی ماوراء بنفش، کمی طیف آبی و قرمز دور و همچنین ناپایداری و متغیر بودن نسبت قرمز/ قرمز دور است. بنابراین این لامپ‌ها از نظر طیفی و انرژی بهینه نیستند. از طرفی به دلیل انتشار دی اکسید کربن و آلودگی نوری دوستدار محیط زیست نیستند [۹].

پیشرفت‌های اساسی در نوردهی مصنوعی گیاهان از اواسط دهه ۱۹۸۰ همزمان با شروع تحقیقات نور ال‌ای‌دی آغاز شد. لامپ‌های ال‌ای‌دی به صورت نیمه‌هادی جامد هستند و نور را از طریق الکترولومینسانس ایجاد می‌کنند. این لامپ‌ها به عنوان منابع نوری مناسب برای کنترل تنظیم طیف نوری و شدت نور هستند. با توجه به نیمه‌هادی بودن، نور را در طول موج‌های مشخص با رنگ‌های متفاوت از طیف مرئی و فراتر از آن، از ۲۵۰ (فرابنفش C) تا ۱۰۰۰ نانومتر (مادون قرمز)، در باندهای نسبتاً باریک تولید نموده و امکان ترکیب طیف‌ها را نیز فراهم می‌کنند. طیف‌های آنها بازده انرژی بالاتری را نسبت به منابع نور سنتی نشان داده است و به دلیل حالت جامد شان، ایمن تر و مقاوم‌تر از لامپ‌های رشته‌ای، گازی تحت فشار یا جیوه‌ای هستند و برای استفاده مناسب تراند. بعلاوه برای استفاده در دمای پایین (تا ۴۰- درجه سانتیگراد) و حتی رطوبت بالا مناسب‌اند. این لامپ‌ها تابش گرمای کمی ایجاد نموده و تداخلی در کنترل دمای محیطی ایجاد نمی‌کنند. همچنین بدلیل حجم کم این لامپ‌ها، امکان قرارگیری آنها در نزدیکی تاج پوشش گیاه وجود دارد. تغذیه این لامپ‌ها به ولتاژ پایینی نیاز داشته و دارای مزیت‌هایی برای استفاده در مهندسی و طراحی باکس‌های نوری هستند. در نهایت ال‌ای‌دی‌های مجهز به درایور و تراشه‌ها انعطاف‌پذیر بوده و برای کنترل دیجیتال و پروتکل‌های نوری روزانه مناسب‌اند [۱۰].

در ماموریت فضایی STS- 128 ژاپن، یک واحد رشد گیاهی طراحی شد که حاوی ۲۸ اتاقک رشد گیاهی بود. هر واحد آزمایش گیاهی مجهز به سیستم روشنایی ال‌ای‌دی با نورهای قرمز و آبی، سیستم آبیاری خودکار و دوربین بود. در این اتاقک‌ها رشد گیاه

نزدیکی محل اتصال، نوار رسانایی با سطح انرژی پایین تر ایجاد شده و انرژی به صورت فوتون آزاد می‌شود (شکل ۱). این پدیده نوعی الکترولومینسانس را ایجاد نموده و طیف نوری باریک و نامنسجم ساطع می‌شود [۶].



شکل ۱- اصول کار (الف) و ساختار لامپ ال‌ای‌دی (ب) [۶]

۳ منابع نوری سنتی و مدرن برای کشت گیاه

لامپ‌های الکتریکی نزدیک به ۱۵۰ سال است که به عنوان نور مصنوعی در کشت گیاهان استفاده می‌شوند. به طور کلی، برای ایجاد نور مصنوعی از سه فناوری اصلی استفاده می‌شود: (الف) لامپ‌های رشته‌ای که مخترع آن ادیسون بود. (ب) لامپ‌های فلورسنت که در آن از میله‌های کربنی استفاده شده و در اواخر دهه ۱۸۰۰ برای روشنایی خیابان‌ها در برخی شهرها رایج شد و (ج) لامپ‌های تخلیه گازی که با بخار جیوه بود و در اواخر دهه ۱۸۰۰ توسعه یافت [۷].

هر کدام از این لامپ‌ها دارای کاربردهای خاصی هستند. لامپ‌های فلورسنت با توجه به جذب نوری، به ویژه لامپ‌هایی که دارای طیف‌های آبی، قرمز و سفید فلورسنت به طور گسترده توسعه یافتند و در اتاق‌های رشد، همراه با دیگر منابع نوری برای دستیابی به یک جریان فوتون فتوسنتزی پایدار استفاده می‌شدند. بعلاوه، لامپ‌های فلورسنت، به ویژه لامپ‌های سفید، به طور گسترده در فیتوترون‌ها و برای تکثیر درون شیشه استفاده می‌شوند لامپ‌های تخلیه با شدت بالا مانند متال هالید و لامپ‌های سدیم با فشار بالا

آرابیدوپسیس^۴ مورد مطالعه قرار گرفت و نیازی به سیستم خنک کننده بدلیل استفاده از لامپ‌های ال‌ای‌دی نبود [۱۱].

سیستم تولید و گی‌توسط ناسا (سال ۲۰۱۴) برای تولید غذا تازه تحت شرایط بی‌وزنی طراحی شد. در این سیستم گیاه کاهو^۶ کشت شد و برای روشنایی از یک پنل ال‌ای‌دی شامل طیفهای قرمز، آبی و سبز استفاده گردید. گیاهچه‌های تولید شده در سیستم و گی مطابق استانداردهای میکروبیولوژی ناسا پرورش یافته بود و برای اولین بار در دهم آگوست ۲۰۱۵، توسط فضانوردان به صورت رسمی مورد استفاده غذایی قرار گرفت [۱۲].

۴ اثرات مفید کشت گیاهان با نور ال‌ای‌دی

۴.۱ رشد گیاه تحت نور ال‌ای‌دی

تأثیر نور ال‌ای‌دی بر رشد و تولید بیومس در ارتباط با عملکرد گیرنده‌های نوری مختلف است. در کاهو نشان دادند که نور ال‌ای‌دی قرمز سبب القای رشد و طول هیپوکوتیل شد و تحریک فیتوکروم‌ها تحت نور ال‌ای‌دی قرمز بیشتر از نور قرمز دور بود. البته طول شدن هیپوکوتیل‌ها با افزودن نور آبی کاهش یافت که می‌تواند در ارتباط با فعال شدن کریپتوکروم‌ها، نوعی گیرنده نوری نور آبی بوده و طول هیپوکوتیل را کاهش دهد [۱۳].

تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر رشد و پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه لفل نشان داد که قطر ساقه، طول ساقه، سطح برگ، رشد هیپوکوتیل و تولید بیومس تحت نور قرمز-آبی (با نسبت ۱ به ۵) بیشتر از سایر تیمارهای نوری بود. وزن خشک گیاه نیز تحت نور قرمز آبی نسبت به نور فلورسنت افزایش معنی داری یافت. طیف‌های نوری با القای جریان پروتونی سلول‌های اپیدرمی سبب توسعه سطح برگ گیاه و القای رشد می‌شوند [۱۴]. نور آبی با فعال سازی پمپ‌های پروتونی و گیرنده‌های نور آبی و نور قرمز با تعدیل فعالیت کانال‌های کلسیمی و پتاسیمی بر هدایت یونی غشا اثر گذاشته و سبب القای رشد می‌شوند [۱۵].

ترکیب نور آبی و قرمز، کارایی فتوسنتزی بالاتری را نسبت به نور تک رنگ دارد که برخی آنرا را به جذب بالاتر نیتروژن در گیاهان تحت نور آبی نسبت می‌دهند، در حالیکه عده‌ای دیگر آن را در ارتباط با باز شدن بهتر دهانه روزنه‌ها دانسته و دی اکسید کربن بیشتری برای فتوسنتز فراهم می‌گردد. به خوبی ثابت شده است که باز شدن روزنه‌ها توسط گیرنده‌های نور آبی کنترل می‌شود و سبب افزایش ماده خشک تحت نور آبی می‌شود [۱۶]. هنگامیکه نور ال‌ای‌دی آبی+قرمز در ترکیب با ال‌ای‌دی‌های سبز، سنتز کلروفیل و رشد را افزایش می‌دهد. البته درصد بالای نور سبز (بیش از ۵۰٪)

سبب کاهش رشد گیاه می‌شود، اما تیمارهای حاوی نور سبز تا ۲۴٪ باعث افزایش رشد در برخی گونه‌ها شد [۱۷]. بنظر می‌رسد افزایش رشد در ارتباط با تأثیر طیف‌ها بر جریان یونی، سنتز کلروفیل و القای فرایند فتوسنتزی باشد. Lee و همکاران نشان دادند که نور ال‌ای‌دی سبب القای فتوسنتز، میزان دی اکسید کربن تثبیت شده و هدایت روزنه‌ای شد [۱۸].

۴.۲ تغییر متابولیت‌ها با نورهای ال‌ای‌دی

گیاهان مکانیسم‌های پاسخی کوتاه و بلندمدت را برای کاهش اثرات نور در شدت زیاد توسعه داده اند که شامل ایجاد رنگیزه زانتوفیل، اکسیداسیون/ احیا از طریق تنفس نوری، تغییر مقدار آنتی‌اکسیدان‌ها و غیره می‌باشد که بیانگر تغییرات متابولیکی تحت تنش است. این مکانیسم‌ها سبب القای رشد، جاروب نمودن گونه‌های فعال اکسیژن و یا ذخیره متابولیت‌های ثانوی می‌شود. سنتز این متابولیت‌ها معمولاً "در پلاستیدها انجام می‌شود و نیاز به فرایندهای پلاستییدی برای سنتز آن‌ها است [۸].

سنتز متابولیت‌های ثانویه در گیاهان بسته به گونه و شرایط رشد می‌تواند متفاوت باشد. تأثیر کارایی نور ال‌ای‌دی در میکروارگانیسم‌های فتوسنتز کننده بدلیل پتانسیل بالای آن در بیوتکنولوژیکی و اقتصاد (ساخت‌های زیستی، دارویی، افزودنی‌های غذایی و لوازم آرایشی) بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر نور ال‌ای‌دی تک رنگ بر تولید بیومس جلبک اسپیرولینا بررسی شد و نتایج نشان داد که نور ال‌ای‌دی قرمز سبب تولید بالای بیومس در مقایسه با نور آبی شد. در جلبک دونلیلا، افزایش شدت نوری سبب تجمع بتا-کاروتن شد. نور ال‌ای‌دی قرمز و آبی می‌تواند باعث ایجاد تنش و القای سنتز زانتوفیل شود. در جلبک سبز همتاتوکوکوس پلوویالیس^۷، نور قرمز رشد را تحریک نمود و نور آبی تجمع آستاگزاتین را افزایش داد که در ارتباط با تأثیر این طیف‌ها بر محتوای رادیکال‌های آزاد و فعال‌سازی آنزیم‌های مسیر بیوسنتزی متابولیت‌های ثانوی بود [۸].

۴.۳ تمایز و عدم تمایز کلروپلاست

گیاهان در شرایط عدم نور یا سایه، علائم اتیولاسیون مانند عدم وجود کلروفیل، کاهش اندازه برگ و کشیدگی هیپوکوتیل را نشان می‌دهند. هنگامی که گیاهان در معرض نور قرار می‌گیرند، تمایز کلروپلاست از طریق سنتز پروتئین‌ها، لیپیدها و رنگدانه‌های فتوسنتزی صورت می‌گیرد. شدت نور ال‌ای‌دی در سنتز کلروفیل اهمیت دارد، بطوریکه، نور ال‌ای‌دی در شدت ۱۰۰ میلی مول بر متر مربع بر ثانیه سبب افزایش تجمع کلروفیل نسبت به شدت ۵۰۰ میلی مول در گیاه گندم شد [۱۹].

6. *Lactuca sativa*
7. *Haematococcus pluvialis*

4. *Arabidopsis thaliana*
5. *VEGGIE*

طول موج‌های قرمز و قرمز دور است. سه پروتئین گیرنده نوری دیگر شامل کریپتوکروم‌ها، فتوتروپین‌ها و کمپلکس ZTL/FKF1/LKP2، گیرنده‌های نور آبی و UV-A هستند. گیرنده پروتئینی UVR8 نیز به طول موج‌های UV-B حساس است. این گیرنده‌های نوری توسط خانواده‌ای از مولکول‌ها به رمز درآمده و هر یک با ژن متفاوتی کدگذاری می‌شوند [۲۲].

گیرنده‌های پروتئینی قادر به درک طول موج‌های خاص طیف نوری، از ۲۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر هستند. در آراییدوپسیس، نوعی گیاه مدل، چهار دسته اصلی گیرنده‌های نوری شامل فیتوکروم‌ها که برای دریافت نور قرمز (با پیک جذب ~ 660 نانومتر) و قرمز دور (با پیک جذب ~ 730 نانومتر) عمل می‌کنند (جدول ۱) [۲۲]. بعلاوه، پنج نوع فیتوکروم مختلف نیز شناسایی شده است که شامل فیتوکروم‌های A، B، C، D و E هستند. فیتوکروم B فرم فیزیولوژیکی غیرفعال فیتوکروم را به فرم فعال تبدیل می‌کند و سبب راه اندازی فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف می‌شوند. پاسخ‌های فیزیولوژیکی نظیر فرار از سایه را تنظیم می‌کنند و در بیان ژن‌های درگیر بر اساس نسب قرمز/قرمز دور نقش دارند. گیرنده‌های فیتوتروپین در تنظیم گلدهی، پیری، اتیولاسیون و رفع اتیولاسیون نقش دارند. گیرنده‌های نوری آبی در فرایندهای فتوتروپسم، جابجایی کلروپلاست، باز شدن روزنه، رشد لپه‌ها و توسعه برگ نقش دارند [۲۳]. در آراییدوپسیس، سه نوع کریپتوکروم (CRY) مختلف شامل CRY1، CRY2 و CRY3 وجود دارد. پروتئین‌های CRY1 و CRY2 در داتیولاسیون نقش دارند [۲۴]. درک نور توسط گیرنده‌های نوری می‌تواند در ارتباط با تحریک فعالیت پمپ‌های پروتونی و کانال‌های کلسیمی و پتاسیمی بوده و نور توسط گیرنده‌ها دریافت و سیگنال آن به هسته منتقل می‌شود [۱۵].

شدت بالای نور قرمز منجر به عدم تجمع کلروفیل شد که می‌تواند ناشی از تخریب سریع مولکول‌های کلروفیل باشد. در برگ چای، اتیلاسیون محتوای ترکیبات فرار (معطر)، به ویژه فنیل پروپانویدها/بنزنوئیدها و چندین اسید آمینه از جمله فنیل آلانین را افزایش داد که نشان دهنده فعال شدن مسیر شیکیمات تحت نور ال‌ای‌دی در پلاستیدها است [۲۰].

کلروپلاست‌ها حاوی رنگیزه کلروفیل و جایگاه فتوسنتز در سلول‌های گیاهی هستند. اگر سنتز کلروفیل کاهش یابد و یا بلوکه شود، ساختار کلروپلاست تغییر خواهد یافت. تیمارهای مختلف نوری بر نمو کلروپلاست‌ها تاثیر دارند. هنگامیکه کلروپلاست‌ها تحت تیمارهای نور آبی قرار می‌گیرند، توانایی دریافت نوری آن افزایش یافته و راندمان تبدیل انرژی غشای فتوسنتزی بهبود می‌یابد. درحالی‌که تیمار نور زرد، برگ‌ها کوچک‌تر شده و در ساختار و آرایش لاملای تیلاکوئید اختلال ایجاد شده و ظرفیت فتوسنتزی کاهش می‌یابد. اما تیمارهای نور آبی و قرمز ساختار دست نخورده باقی مانده و کارایی فتوسنتزی افزایش می‌یابد. بنظر می‌رسد افزایش سنتز رنگیزه‌های تحت نور ال‌ای‌دی در ارتباط با تاثیر این طیف‌ها بر ساختار و آرایش تیلاکوئیدها باشد [۲۱].

۴.۴ گیرنده‌های نوری در گیاهان

گیاهان مکانیسم‌های پیچیده‌ای برای تشخیص و پاسخ به کمیت و کیفیت نور توسعه داده‌اند و شبکه‌ای از مسیرهای درک نوری را فعال نموده که اساس فرآیندهای فوتومورفوزن هستند. فوتومورفوزن به مفهوم تغییر مورفولوژی و نمو گیاه تحت نور بوده و طی این فرایند متابولیت‌های متعددی سنتز می‌شوند. درک نور در گیاهان توسط گیرنده‌های نوری صورت می‌گیرد. پنج دسته از پروتئین‌های گیرنده نوری برای شروع پاسخ گیاه به نور شناسایی شده‌اند (جدول ۱). رده اول توسط خانواده فیتوکروم، برای جذب

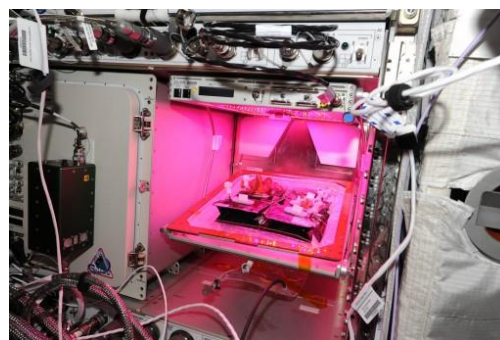
جدول ۱- انواع گیرنده‌های نوری و پاسخ‌های گیاه

پاسخ گیاه	گیرنده‌های نوری	طول موج نوری
جوانه زنی، داتیوله شدن، دوری از سایه، بازدارندگی طولیل شدن ساقه، توسعه برگ، ریتم شبانه روزی [۲۳].	فیتوکروم‌ها	قرمز- قرمز دور (۶۰۰-۷۵۰ نانومتر)
داتیوله شدن، توسعه برگ، ریتم شبانه روزی، سنتز فلاونوئید، گل دهی [۲۴].	کریپتوکروم‌ها	سبز (۵۳۰-۵۷۰ نانومتر)
باز شدن روزنه‌ها، افتادگی برگ، تنفس نوری، تجمع کلروپلاست [۲۳].	فیتوتروپین‌ها	آبی (۳۹۰-۵۰۰ نانومتر)
گل دهی، ریتم شبانه روزی [۲۲].	ZTL/FKF1/LKP2	UV-A (۳۲۰-۳۹۰ نانومتر)
داتیوله شدن، بیوسنتز فلاونوئید [۲۳].	UVR8	UV-B (۲۹۰-۳۱۵ نانومتر)

۵ طراحی سیستم‌های کشت گیاه برای مطالعات فضایی

گیاهان در مطالعات ایستگاه بین‌المللی برای تولید اکسیژن، تصفیه هوا و مکمل غذایی کاربرد دارند. از آنجائیکه سیستم‌های نوری سنتی نیاز به منبع انرژی بالا و وزن زیاد بودند و در محیط‌های بسته گرمای زیادی تولید نمود، برای مطالعات فضایی مناسب نبودند. از اینرو سیستم‌های مختلفی از جمله آستروکالچر، سیستم رشد لادا، سیستم کشت ماژول گیاهی EMCS^۱، سیستم تحقیقات زیستی پیشرفته ABR^۲ و سیستم کشت وگی طراحی شد که از طیف‌های نوری ال‌ای‌دی برای سیستم نوردهی استفاده شد. ابتدا از طیف‌های تک رنگ قرمز و آبی در این سیستم‌ها استفاده شد. ولی با مطالعاتی که روی گیرنده‌های نوری صورت گرفت و نتایج بدست آمده از تحقیقات روی سیستم‌های کشت، طراحی‌ها پیشرفته تر شد. سیستم وگی به عنوان پیشرفته‌ترین سیستم معرفی شد و از طیف‌های ال‌ای‌دی ترکیبی قرمز، آبی و سبز برای روشنایی استفاده نمود (شکل ۲). دارای سیستم پنل تنظیم شدت و کیفیت نور و همچنین سیستم انتقال مواد غذایی برای ریشه تعبیه شد که مواد مغذی را به ریشه انتقال می‌داد. از این سیستم برای تهیه گیاه تازه و رشد رویشی در ایستگاه بین‌المللی استفاده شد [۲۵].

در گیاه آفتابگردان نشان دادند که افزودن نور سبز به نور سفید فتوسنتز را بهبود بخشید و فرضیه شد که نقش نور سبز به دلیل نیاز بسیار پایین نیایستی دست کم گرفته شود. نور آبی و قرمز عمدتاً در سمت بالایی برگ جذب می‌شوند و نور سبز در سلول‌های مزوفیلی نفوذ می‌کند و در لایه‌های عمیق تر برگ جذب می‌شود. از این نظر، با توجه به اینکه نور سبز قادر به نفوذ بیشتر و عمیق‌تر در تاج پوشش است، نور سبز می‌تواند در ارتباط با فتوسنتز در برگ‌های پایینی و داخلی گیاه باشد، حتی اگر از نظر بازده کوانتومی نسبت به نور قرمز و آبی کارایی کمتری داشته باشد [۲۶].



شکل ۲- سیستم کشت وگی با نور ال‌ای‌دی در ایستگاه بین‌المللی فضایی [۲۷].

۶ نتیجه‌گیری

افزایش تقاضای محصولات کشاورزی و جمعیت روزافزون جهان نیاز به راه‌اندازی سیستم‌های رشد کنترل شده از جمله گلخانه، اتاق‌های رشد و کشاورزی عمودی بوده که با استفاده از سیستم‌های نور مصنوعی امکانپذیر است. ابتدا نورهای مکمل نظیر لامپ‌های فلورسنت، متال هالید یا لامپ‌های تخلیه گازی برای جایگزینی نور خورشید در این سیستم‌های کشت معرفی شدند، ولی این لامپ‌ها دارای مشکلاتی از جمله طول عمر کم، مصرف بالای انرژی و تولید گرمای زیاد بودند. لامپ‌های ال‌ای‌دی دارای راندمان و طول عمر بالایی بوده، گرمای کم ایجاد نموده و می‌توانند در این سیستم‌های کشت استفاده شوند. نور ال‌ای‌دی دارای طیف‌های مختلف بوده و انتخاب طیف مناسب در ارتباط با نیاز نوری گیاه است. هر یک از طیف‌های مختلف توسط گیرنده‌های نوری مختلفی دریافت شده و می‌تواند پاسخ‌های مختلف رشد را تحریک نماید. لامپ‌های ال‌ای‌دی تجمع رادیکال‌های آزاد را نیز افزایش می‌دهند. رادیکال‌های آزاد در تراکم کم نظیر ملکول‌های سیگنالینگ عمل نموده و بر بیان ژن‌های متابولیت‌های ثانوی اثر نماید و در تراکم بالا باعث آسیب سلولی شود. در شروع مطالعات فضایی گیاهی، برای سیستم روشنایی از لامپ‌های فلورسنت استفاده شد که کارایی کمی از نظر رشد گیاهچه‌ها و تولید بیومس داشت و سپس از طیف‌های ال‌ای‌دی با طیف‌های مختلف در ساخت اتاقک‌های رشد گیاهی استفاده شد. تحقیقات نشان داد که بهترین طیف‌ها در ساخت ماژول‌های گیاهی، طیف‌های ترکیبی قرمز، آبی و سبز هستند که در ساخت اتاقک رشد گیاهی وگی در ایستگاه بین‌المللی استفاده شد. این لامپ‌ها با تاثیر بر فراساختار تیلاکوئیدها، فعال سازی پمپ‌های پروتونی، تعدیل فعالیت کانال‌های کلسیمی و پتاسیمی بر هدایت یونی غشا اثر گذاشته و سبب القای بیشتر رشد می‌شوند. از طرفی، تعداد لامپ‌های مورد نیاز و شدت روشنایی بستگی به گونه گیاهی مورد مطالعه دارد. در سیستم وگی از سه طیف قرمز، آبی و سبز برای رشد رویشی و گلدهی گیاه کاهو در ایستگاه بین‌المللی استفاده شد. البته بررسی اثر طیف‌های نوری بر بیان ژن‌های مرتبط با فتوسنتز نیاز به بررسی بیشتر در آینده دارد.

۷ تشکر و قدردانی

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

۸ منابع

- 2013,
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2013AdSpR..51..780Y/doi:10.1016/j.asr.2012.10.02.
- [12] R. Morrow, R. Remiker, M. Mischnick, L. Tuominen, M. Lee, and T. Crabb, "A low equivalent system mass plant growth unit for space exploration," SAE Technical Paper0148-7191, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-2843>.
- [13] T. Ahmadi, L. Shabani, and M. R. Sabzalian, "Improvement in drought tolerance of lemon balm, *Melissa officinalis* L. under the pre-treatment of LED lighting," *Plant physiology and biochemistry*, vol. 139, pp. 548-557, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.021>.
- [14] M. Staal, J. T. M. Elzenga, A. G. van Elk, H. B. Prins, and E. Van Volkenburgh, "Red and blue light-stimulated proton efflux by epidermal leaf cells of the *Argenteum* mutant of *Pisum sativum*," *Journal of Experimental Botany*, vol. 45, no. 9, pp. 1213-1218, 1994, <https://doi.org/10.1093/jxb/45.9.1213>.
- [15] E. V. Volkenburgh, "Leaf expansion—an integrating plant behaviour," *Plant, Cell & Environment*, vol. 22, no. 12, pp. 1463-1473, 1999, <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00514.x>.
- [16] G. D. Goins, N. C. Yorio, M. M. Sanwo-Lewandowski, and C. S. Brown, "Life cycle experiments with *Arabidopsis* grown under red light-emitting diodes (LEDs)," *Life Support & Biosphere Science*, vol. 5, no. 2, pp. 143-149, 1998.
- [17] H. H. Kim, R. M. Wheeler, J. C. Sager, G. Gains, and J. Naikane, "Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment—a review of research at Kennedy Space Center," in *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture 711*, 2005, <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.11>, pp. 111-120.
- [18] S.-H. Lee, R. K. Tewari, E.-J. Hahn, and K.-Y. Paek, "Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal. plantlets," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 90, pp. 141-151, 2007, <https://doi.org/10.1007/s11240-006-9191-2>.
- [19] B. C. Tripathy and C. S. Brown, "Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light," *Plant Physiology*, vol. 107, no. 2, pp. 407-411, 1995, <https://doi.org/10.1104%2Fpp.107.2.407>.
- [20] J.-M. Brillouet *et al.*, "The tannosome is an organelle forming condensed tannins in the chlorophyllous organs of *Tracheophyta*," *Annals*
- [1] W. D. Fernando, "Plants: An international scientific open access journal to publish all facets of plants, their functions and interactions with the environment and other living organisms," *Plants*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2012, <https://doi.org/10.3390/plants1010001>.
- [2] 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, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>.
- [3] B. Harvey and O. Zakutnyaya, *Russian space probes: Scientific discoveries and future missions*. Springer, 2011, <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8150-9>.
- [4] D. Porterfield, G. Neichitailo, A. Mashinski, and M. Musgrave, "Spaceflight hardware for conducting plant growth experiments in space: The early years 1960–2000," *Advances in Space Research*, vol. 31, no. 1, pp. 183-193, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00752-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00752-4).
- [5] M. Loi, C. Paciolla, A. F. Logrieco, and G. Mulè, "Plant bioactive compounds in pre-and postharvest management for aflatoxins reduction," *Frontiers in Microbiology*, vol. 11, p. 243, 2020, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00243>.
- [6] A. S. A. Mishra, C. Nichkil, B. Jithender, "Applications of light emitting diodes for post-harvest quality management of fruits and vegetables," *Agriculture & Food*, vol. 1, pp. 404-408, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02534-6>.
- [7] R. M. Wheeler, "A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop," *HortScience*, vol. 43, no. 7, pp. 1942-1943, 2008, <http://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1942>.
- [8] E. Darko, P. Heydarizadeh, B. Schoefs, and M. R. Sabzalian, "Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 369, no. 1640, p. 20130243, 2014, <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>.
- [9] P. Pinho, K. Jokinen, and L. Halonen, "Horticultural lighting—present and future challenges," *Lighting Research & Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 427-437, 2012, <https://doi.org/10.1177/1477153511424986>.
- [10] J. A. Nelson and B. Bugbee, "Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures," *PloS one*, vol. 9, no. 6, p. e99010, 2014, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>.
- [11] S. Yano *et al.*, "Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station," *Advances in Space Research*, vol. 51, no. 5, pp. 780-788,

- movement," *Annu. Rev. Plant Biol.*, vol. 58, pp. 219-247, 2007, <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.0329.05.105434>.
- [25] H. Hassanpour and F. J. J. o. T. i. A. E. Mousavi, "Plant Growth Chamber for Space Studies," vol. 1, no. 2, pp. 45-53, 2017.
- [26] I. Terashima, T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow, and R. Oguchi, "Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green," *Plant and cell physiology*, vol. 50, no. 4, pp. 684-697, 2009, <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>.
- [27] G. D. Massa, R. M. Wheeler, R. C. Morrow, and H. G. Levine, "Growth chambers on the International Space Station for large plants," in *VIII International Symposium on Light in Horticulture* 1134, 2016, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.29>, pp. 215-222.
- of Botany*, vol. 112, no. 6, pp. 1003-1014, 2013, <https://doi.org/10.1093/aob/mct168>.
- [21] S. Gao, X. Liu, Y. Liu, B. Cao, Z. Chen, and K. Xu, "Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of welsh onion (*Allium fistulosum* L.) grown under different LED wavelengths," *BMC plant biology*, vol. 20, pp. 1-12, 2020, <https://doi.org/10.1186/s12870-020-2282-0>.
- [22] O. Alrifai, X. Hao, R. Liu, Z. Lu, M. F. Marcone, and R. Tsao, "Amber, red and blue LEDs modulate phenolic contents and antioxidant activities in eight Cruciferous microgreens," *Journal of Food Bioactives*, vol. 11, 2020, <http://dx.doi.org/10.31665/10.31665/JFB.2020.11241>.
- [23] J. M. Christie, L. Blackwood, J. Petersen, and S. Sullivan, "Plant flavoprotein photoreceptors," *Plant and Cell Physiology*, vol. 56, no. 3, pp. 401-413, 2015.
- [24] K.-i. Shimazaki, M. Doi, S. M. Assmann, and T. Kinoshita, "Light regulation of stomatal