

بهینه‌سازی سیستم نوردهی برای رشد گیاه در سیستم پشتیبان حیات

سیستم نوردهی یکی از مهم‌ترین اجزای گلخانه یا محفظه‌های رشد گیاه در سیستم پشتیبان حیات پیشرفته است. تاکنون چندین طراحی برای این سیستم‌های نوردهی پیشنهاد شده است که استفاده از نور خورشید طبیعی و نورهای مکمل الکتریکی را شامل می‌شود. اگرچه نور الکتریکی انرژی پرمصرفی است، به دلیل محدودیت‌هایی که رشد گیاه در نور خورشید سطح ماه یا مریخ دارد، استفاده از آن ضروری است. مشخصات انواع مختلف نورهای الکتریکی و کاربرد آنها در فضا اهمیت زیادی دارد. لامپ‌های نوری مختلفی برای سیستم پشتیبان حیات پیشرفته بر مبنای نورهای الکتریکی پیشنهاد شده است که هر یک مزایا و معایبی دارند. نتایج بررسی‌ها نشان داده است استفاده از نور LED نیز به دلیل مصرف کم انرژی، عدم تولید گرما و افزایش محصول گزینه مناسبی برای طراحی سیستم پشتیبان است. در این مقاله تأثیر نورهای مختلف برای استفاده در سیستم پشتیبان حیات بررسی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: سیستم پشتیبان حیات، فضا، نور، لامپ‌های LED

حلیمه حسن پور^{۱*}، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

رقیه پورحبیبیان^۲، دانشجوی دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

*نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کدپستی:

۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

hassanpour@ari.ac.ir

Optimization of Lighting System for Plant Growth in Life Support System

The lighting system is one of the most important components of greenhouse or plant growth chambers in Advanced Life-support System (ALSS). Several designs of such lighting systems have been proposed including the use of natural sunlight and electric supplemental lighting. Due to the limitations of plant growth under natural sunlight on the surface of the moon or Mars, it is essential to use electric lighting although it is high-energy consuming. The characteristics of different electric light types are important in space applications. Different lighting systems are recommended for Earth-based advanced life-support (ALS) system based on electric lighting that have advantages and disadvantages. The results state that LEDs are appropriate for life support system design due to low-energy consumption, lack of heat production, and induction of crop production. In this paper, effect of different light is investigated for usage in the life support system

Keywords: Life support system, Space, Lighting, LEDs

H. Hasanpour^{1*}, Assistant Professor, Assistant Professor, Aerospace research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

R. Pourhabibian², PhD Student, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Department of biology

*Corresponding Author, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

hassanpour@ari.ac.ir

شده است که مجهز به یک کپسول رزین آکریلیک برای حفاظت همراه ۷ مینی لنز فرسنل شش ضلعی و یک حسگر نوری مربعی در گوشه بالایی سمت چپ لنزهاست [۶].



شکل ۱- سیستم چشم فیبری بر پایه لنز فرسنل [۶].

دومین سیستم، 4 OW است که نور از آینه‌های سهمی چرخشیروی کوارتز جامد متمرکز و به کابل چشم فیبری منتقل می‌شود [۶]. البته زمانیکه نور از چشم‌های فیبری منتقل می‌شود، اتلاف انرژی ۲/۵-۶/۷٪ در متر دیده می‌شود [۶-۷]. اگرچه نور بیشتری با کمک متمرکزکننده‌های موج چشمی تولید می‌شود، سطح نوری در آن بسیار غیریکنواخت و تغییرپذیر است [۶]. همچنین، در روزهای ابری یا بارانی نور در دسترس کاهش می‌یابد و می‌تواند سبب کاهش بازده محصول شود [۷]. در سطح مریخ، طوفان‌های گرد و خاک به صورت خیلی شدید و طولانی‌مدت اتفاق می‌افتد و اشعه خورشیدی را کاهش می‌دهد. در بیشتر مناطق ماه بجز در ناحیه قطب جنوب، شب کوتاه است. تابش مستقیم یا غیرمستقیم نور خورشید به عنوان منبع انرژی اولیه پشتیبانی حیات در سطح ماه یا مریخ قابل اعتماد نیست. از این‌رو، انرژی خورشیدی نمی‌تواند انتخاب مناسبی برای حمایت از تولید گیاه در ماه و مریخ باشد و بنابراین، به نور الکتریکی نیاز است.

ویژگی‌های منابع نوری برای طراحی سیستم پشتیبان حیات

منبع نور الکتریکی سازگار با سیستم پشتیبان حیات در خارج از زمین باید ویژگی‌ها ذیل را داشته باشد:

- ۱) توانایی تبدیل نیروی الکتریکی به فوتون‌های اشعه فعال فوتوستتزی (PAR) را داشته باشد.
- ۲) حرارتی کمی تولید کند.
- ۳) عمر بالایی داشته باشد.

مقدمه

برای پشتیبانی از حیات بشر در سفرهای طولانی به فضا به کشت محصولات غذایی نیاز است. برنامه پشتیبانی از حیات پیشرفته تحقیقاتی را شامل می‌شود که در ارتباط با تصفیه آب، تصفیه هوا، بازیافت زباله و تولید غذاست. هدف نهایی تحقیقات سیستم پشتیبان حیات، حمایت از زیستگاه‌های بشر در زمین برای مدت نامحدود یا فراهم‌سازی سیستم پشتیبان حیات مناسب برای زندگی با انرژی تجدیدپذیر است. برنامه پشتیبانی از حیات پیشرفته بر مبنای یک سیستم پشتیبان حیات اکولوژیکی بسته استوار است. کشورهای روسیه، ژاپن، کانادا، آژانس فضایی اروپا و اخیراً چین درخصوص این سیستم مطالعه کرده‌اند. همزیستی بین گیاه و انسان در این سیستم بسته اهمیت چشمگیری دارد و تمرکز اصلی روی تولید گیاه برای استفاده انسان در فضا است.

در مطالعات اولیه از میکروجلیک‌هایی مثل کلرلا برای تولید غذا و اکسیژن و تصفیه در سیستم پشتیبان حیات آمریکا، اروپا و جاهای دیگر استفاده شد. سپس، تحقیقات درباره گیاهان عالی انجام و طراحی و تست زیستگاه‌های رشد گیاهان برای مطالعه آنها در سطح ماه و مریخ ارزیابی شد. این طرح مشابه گلخانه‌ای پر از گاز بود که در آن گیاهان با استفاده از نور خورشید فتوسنتز انجام می‌دادند. طراحی چنین گلخانه‌ای نیاز به کیسه‌های پلاستیکی نازک شفاف دارد تا بتواند فشار کم اتمسفر خارج، شیب و نوسانات زیاد دمای خارجی، شارش قوی اشعه UV-C، اثرات میکروشهاب‌سنگ‌ها، پیامدهای ذرات خورشیدی و تشعشعات کیهانی را تحمل کند [۴-۱]. روی سطح ماه، دوره‌های طولانی تاریکی حاکم می‌شود و بر سطح مریخ، طوفان گرد و خاک غیرقابل پیش‌بینی، چرخه نوری روزانه و فصلی رخ می‌دهد. بنابراین، استفاده از نور خورشید برای رشد گیاهان در ماه و مریخ، مشکلاتی را برای رشد گیاهان به وجود خواهد آورد. استفاده از چشم‌های فیبری یا لوله‌های نوری نیز سبب بروز مشکلات دیگری برای رشد گیاهان خواهد شد [۵-۶].

جک^۱ و همکارانش درخصوص سیستم‌های چشم‌های فیبری یا لوله‌های نوری تحقیق و رشد گیاه را ارزیابی کردند. اولین سیستم، Himawari SICTDS با مجموعه‌ای از لنزهای فرسنل^۲ است که نور خورشید را متمرکز و به یک کابل چشم فیبری هدایت و سپس، به نواحی رشد گیاه ارسالی‌کنند. در شکل ۱ سیستم چشم فیبری بر پایه لنز فرسنل نمایش داده

1. Closed Ecological Life-Support System
2. Jack
3. Fresnel

4. Optical waveguide

قابل تنظیم است؟ آیا شارش فوتون، شکل و یکنواختی نوری را تحت تأثیر قرار خواهد داد؟ همچنین، عامل کیفی تولید نور خیلی مهم است. بعضی گونه‌های روزبلند برای شروع گلدهی به طول موج خاصی نیاز دارند، مانند گیاه جو که به طول موج قرمز دور احتیاج دارد [۹].

کاهو و گندم تحت نور قرمز رشد می‌کنند، اما با افزودن مقدار کمی نور آبی تولید بیومس در آنها بهتر خواهد شد [۱۰-۱۲]. تنظیم‌پذیر بودن (مانند تغییر رنگ با تغییر نسبت نور قرمز به آبی) و تغییر شدت انتشار از عوامل مهم تولید نور هستند. بعضی از گیاهان در نور با طیف آبی رشد بیشتری دارند، در حالیکه برخی دیگر در نور غنی‌شده با نور قرمز همراه تعداد کمی لامپ آبی بهتر رشد می‌کنند. بعضی محصولات نور کم را ترجیح می‌دهند، اما بعضی به نور بیشتر احتیاج دارند، یا نیاز نوری در دوره‌های مختلف رشد و نمو آنها متفاوت است.

لامپ فلورسنت کم‌نور، افت بازده کمی دارد و قدرت ورودی کمتر کاهش پیدا می‌کند [۱۳]. لامپ‌های HID توانایی تغییر طیف دارند، اما قدرت آنها کم است [۱۴]. به علاوه، سطح قدرت کمینه که نیاز به یک جرعه برای روشنایی دارد برای لامپ‌های MH^۵ و HSP^۶ هنوز بالاست [۱۴]. لامپ‌های LED که جریان کنترل‌شده و مداوم دارند، برای مطالعات فضایی مناسب هستند [۱۵]. با تنظیم منبع نور در مراحل مختلف رشد و نمو انتظار می‌رود بیشینه خروجی حاصل شود، اما ویژگی‌هایی مانند کم‌نور شدن که در ارتباط با انرژی، وزن و حجم است در لامپ‌های سنتی پرهزینه است.

موضوع دیگری که در کاهش انرژی برای تولید محصول در یک سیستم بسته باید به آن توجه شود، کاهش میزان تعرق گیاه و مقدار انرژی است که برای متراکم کردن بخار آب نیاز است. در صورت استفاده از لامپ‌های HID، کانوپی^۷ یک گیاه، تقریباً ۴ لیتر بر متر مربع در روز بخار آب خارج می‌شود [۱۶]. شاید در ابتدا احیای آب به‌صرفه به نظر برسد زیرا یک شخص متوسط روزانه به ۲/۵ لیتر آب برای نوشیدن احتیاج دارد [۱۷] و حداکثر ۴۰ لیتر آب هم در سیستم پشتیبان حیات برای کارهای روزانه نیاز است [۱۸]. تغییر فاز از مایع به بخار به ۵۸۲ کالری بر گرم در ۲۵°C لازم دارد. در حقیقت، فناوری سیستم نوردهی گیاه باید به حدی پیشرفت کند که بار حرارتی گیاه کمتر شود و میزان تعرق و به دنبال آن ظرفیت تقطیر آب هم کاهش یابد.

تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با سیستم نوری و کشت گیاهان در فضا انجام شده است. اثر طیف‌ها روی رشد گیاهان

(۴) حجم (ذخیره‌سازی و کاربرد آن) بانک نوری نباید زیاد باشد.

(۵) بازده نوری بالایی داشته باشد.

(۶) کمیت و کیفیت نور قابل تنظیم باشد.

بازده تبدیل انرژی الکتریکی به مقدار نیروی الکتریکی بستگی دارد [۸]. البته مقداری از نیروی الکتریکی ترانسفورماتورها و منابع نوری (لامپ‌ها) به گرما و اشعه با طول موج بلند تبدیل می‌شود. حرارتی که در سطح لامپ‌ها تولید می‌شود باید از منطقه رشد گیاه خارج شود یا به ناحیه دیگری در سیستم پشتیبان حیات هدایت شود و از زیستگاه بیرون رود. انرژی الکتریکی مورد نیاز برای تولید گیاه و خروج گرما در سیستم پشتیبان حیات پرهزینه است. بنابراین، هدف اصلی تحقیقات گیاهی در سیستم پشتیبان حیات، تولید بیشترین مقدار زیست توده با کمترین مقدار مصرف انرژی الکتریکی است.

موضوعی مهم دیگر در سازگاری منبع نور الکتریکی، عمر منبع نوری است که روی تعداد، حجم و مقدار لامپ‌های مورد نیازی تأثیر می‌گذارد که باید در پرتاب موشک وجود داشته باشد. مدت زمانی که کارکنان باید برای پشتیبانی از سیستم نوری صرف کنند نیز باید محاسبه شود. دوام منبع نوری به استحکام ساختار آن و به شدت پرتاب از زمین به فضا بستگی دارد که بسته به شرایطی که در طول میکروگروایتی حاکم می‌شود ممکن است کوتاه (رفتن به ماه) یا طولانی (رفتن به مریخ) باشد. با پیشرفت فناوری‌های پرتاب و فرود، شاید این نوع تنش‌ها کاهش یافته باشد، اما نوع و ترکیب منبع نوری، عامل مهمی برای امنیت و سلامت فضانوردان است.

مقدار و حجم منبع نوری برای بالا بردن توانایی نوری مهم است، اما برای ارسال به فضا پرهزینه خواهد بود. بسته به نوع تسهیلات پروازی، هزینه‌ها متفاوت است و می‌تواند از ده هزار دلار برای هر کیلوگرم تا پایین‌ترین مدار زمین تا سیصد هزار دلار در هر کیلوگرم تا سطح مریخ تخمین زده شود. هزینه برای ارسال به سطح ماه هم بین این دو مقدار تخمین شده می‌شود. موضوع دیگر انتقال و ذخیره حجمی از لامپ‌ها در سفینه فضایی و پایگاه فضایی است. فضایی که در محل رشد گیاه توسط زیرساخت‌های نوری اشغال می‌شود نیز مهم است. سیستم‌های نوری بزرگ فضای گیاهان را محدود خواهند کرد. بنابراین، طراحی سیستم‌های نوری کم‌حجم اهمیت زیادی دارد. موضوع مطرح دیگر در طراحی این است که باید کیفیت، کمیت، شدت و موقعیت سیستم نوری قابل تنظیم باشد و به‌خصوص به سؤال‌هایی که به کمیت نور مربوط می‌شود باید پاسخ داده شود. مثلاً چند گیاه با یک منبع نوری پشتیبانی می‌شوند؟ با توجه به طراحی‌های کشت، یک منبع نوری چقدر

5. Metal Halide
6. High Pressure Sodium Lights

۷. بخشی هوایی گیاه که سطح زمین را می‌پوشاند.

مطالعه و تعداد زیادی منابع نوری برای استفاده در سیستم‌های بسته پشتیبان حیات ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که منابع نوری که در گلخانه‌های زمینی به کار می‌روند، گزینه‌های مناسبی برای کار در سیستم پشتیبان حیات نیستند و منابع نوری سنتی معمولاً گرما تولید و حجم و وزن زیادی را اشغال می‌کند [۸].

تحقیقات نوری برای سیستم پشتیبان حیات

سال‌هاست که از نور فلورسنت برای بررسی رشد گیاهان استفاده می‌شود و مطالعات بنیادی زیادی درباره تأثیر آن انجام شده است. با این نور، به‌خصوص فلورسنت نور سفید که گرما تولید نمی‌کند، گیاهان رشد طبیعی دارند [۱۹]. به تدریج لامپ‌های فلورسنت به دلیل بازده کم کنار گذاشته و به صورت محدود استفاده شدند [۸]، زیرا این لامپ‌ها شارش فوتون فتوسنتزی و توانایی لازم برای حاصلخیزی زیاد را ندارند. اکثر لامپ‌های نوری که قبلاً برای سیستم پشتیبان حیات استفاده شدند در رده لامپ‌های HID قرار داشتند. در مأموریت فضایی روسیه بایوس ۲-^۸، از یک فیتوترون ۴/۵ متر مربع با ۴ لامپ سفید زنون و متوسط تابش ۹۰-۱۱۰ وات بر مترمربع استفاده شد [۲۰].

در مأموریت بایوس ۳-^۹، سیستم پشتیبان حیات متشکل از دو قسمت کشت گیاه، کشت جلبک و محل سکونت سه فضانورد بود. بایوس ۳- منحصربه‌فرد بود، به طوری که برای کنترل کامل فضانوردان با سناریوی پشتیبانی از حیات بدون زمینو یک تیم از افرادی طراحی شده بود که ۶ ماه در قرنطینه بودند. در محفظه رشد گیاه از لامپ‌های مشابه بایوس ۲- استفاده شد که ۲۰ عدد آنها در دو فضای ۳۱/۵ متر مربع تعبیه شده بودند [۲۰]. برای کاهش تشعشعات لامپ‌های زنون، از یک پوشش کوارتزی و یک پوشش شیشه‌ای بهره‌بردار شد که برای خنک‌کاری آب بین دو لایه پوششی جریان داشت. در بایوس ۳- سطح اکسیژن تولید شده گیاهان بیشتر از نیاز سه فضانورد بود و تقریباً ۲/۱ از وقت سه فضانورد صرف کشت جلبک و گیاه می‌شد. همچنین، وقت زیادی صرف تهیه غذا، تصفیه آب و وظایف دیگر می‌شد. حدود ۹۵-۷۸٪ بایوس ۳- به صورت سیستم بسته بود و بنابراین، ذخیره مواد لازم برای حیات بشر را کاهش داد [۲۰].

در مرکز فضایی کندی^{۱۰} از یک نور متفاوت HID استفاده شد. محفظه بزرگ و بسته رشد گیاه، یک محفظه آزمایشی با فشار بالا برای برنامه مرکوری بود. این محفظه ۹۶ لامپ ۴۰۰ وات HPS با ریموت و قابلیت تنظیم نوردهی داشت، اما گاهی اوقات

نیز برحسب نیاز از لامپ‌های MH نیز استفاده می‌شد [۱۶]، [۲۱]. گیاهان کشت داده شده شامل سیب زمینی، گندم، کاهو، گوجه فرنگی و برنج بودند. یکی از آزمایش‌ها بیش از یک سال به طول انجامید و سیب زمینی برای ۴ نسل متوالی در محلول غذایی کشت شد [۱۶]. این مطالعات نشان داد که محصولاتی که در دوره بلوغ نیاز به فضای بیشتری دارند، اگر از محفظه‌های کوچک به مکان بزرگ‌تری منتقل شوند، میزان تولید آنها افزایش خواهد یافت. همچنین، یک پاسخ تقریباً خطی بین نور روزانه و میزان تولید برای انواع گیاهان به دست آمد [۱۶]. نتیجه مهم دیگر این بود که تقریباً تمام گونه‌های گیاهی آزمایش شده، سطح پروتئین و مواد زاید بالاتری داشتند و سطح کربوهیدرات آنها از گیاهان رشد یافته در زمین کمتر بود [۱۶].

در پروژه سیستم پشتیبان حیات مریخ/ماه در مرکز فضایی جانسون برای تصفیه هوا، گیاه گندم در سطحی به مساحت ۱۱/۲ متر مربع کشت شد [۲۰]. هشت بانک نوری با لامپ‌های ۴۰۰ وات HPS در این محفظه استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که رشد گندم در این ناحیه ۲۵٪ دی‌اکسیدکربنی را تصفیه می‌کند که توسط فضانوردان در مدت ۹۱ روز از فاز ۳ آزمایش تولید شده است [۲۲] و سیستم‌های فیزیکیوشیمیایی ۷۵٪ باقی‌مانده را تصفیه کرده‌اند [۲۲]. کشور ژاپن از تسهیلات سیستم بسته اکولوژیکی در شمال جزیره هانشو^{۱۱} و از لامپ‌های HPS برای کشت و زرع استفاده کرد [۲۳-۲۴]. این سیستم بسته اکولوژیکی به مساحت ۱۵۰ متر مربع بود و کشت برنج و سویا در این سیستم، تولید بالایی را نشان داد [۲۴].

تحقیقات LED

دیوهای گسیل نور یا LEDها، منبع نوری نسبتاً جدیدی برای رشد گیاهان هستند و در پروژه‌های زیادی به کار رفته‌اند. هر هفته مقالات جدیدی درباره پیشرفت‌های فناوری LED و پتانسیل این منابع نوری برای خودروها، نور خانگی، محاسبات، کارهای عمومی و غیره منتشر می‌شود. در آغاز کارایی LEDهای قرمز ۱۸-۱۵٪ بود، اما امروزه حداکثر کارایی آنها به ۲۲٪ رسیده است. در حالی که کارایی LEDهای آبی تنها ۳-۴٪ بوده و امروزه به ۱۱٪ رسیده است. به دلیل این افزایش بازده در نوردهی رشد گیاه، LEDها نسبت به منابع دیگر اقتصادی‌تر هستند [۲۵]. پیشرفت مهم دیگری که در تحقیقات LED حاصل شد، دسترسی تجاری ماشین‌های نور LED برای قرارگیری تراشه روی بورد است. برخلاف LEDهای مجزا با لنزهای پلاستیکی، در این نوع از ماشین‌های نوری، تعداد زیادی

8. Bios-2
9. Bios-3
10. Kennedy

جداسازی گرمای منبع نوری از روی گیاه، مقدار برخورد نور به برگ‌ها خیلی ضعیف می‌شود و به منبع نوری با قدرت بالا نیاز خواهد شد. اگر تعداد زیادی منبع نور خنک‌کننده در محیط بسته باشد یا حتی به برگ‌ها برخورد کند، با هزینه کمتر نور بیشتری در دسترس برگ‌ها قرار خواهد گرفت و بازده انرژی برای تولید بیومس بیشتر می‌شود.

استاسیاک^{۱۳} و همکارانش رشد سویا را زیر لامپ نوری بررسی و از طریق لوله‌های شیشه‌ای نور جانبی اضافه کردند. نتایج نشان داد که تولید محصول ۲۳-۸۷٪ افزایش یافت [۳۵]. همچنین، تیبیتس^{۱۴} و همکارش نشان دادند که با استفاده از نورهای جانبی فلورسنت با نور هوایی در گیاه سیب زمینی، وزن خشک غده‌ها ۱۶-۱۲٪ افزایش می‌یابد [۳۶].

در آزمایشی با استفاده از سیستم لامپ فلورسنت به عنوان نور جانبی نشان داده شد که هزینه الکتریکی تولید گیاهچه‌های سیب زمینی کاهش می‌یابد [۳۷]. از آنجا که لامپ‌های فلورسنت حجم زیادی از فضا را اشغال و گرما آزاد می‌کنند، در آزمایش‌های آبی کنار گذاشته شدند. با حذف این نوع لامپ‌ها، کوزای^{۱۵} و همکارانش در آزمایش‌های خود از فیبرهای نوری پراکنده برای تولید نورهای جانبی استفاده کردند که سبب شد بتوان محفظه گیاه را نزدیک منبع نور قرار داد و در نتیجه، بازده نور و میزان بیومس توسط گیاهچه‌ها افزایش یافت [۳۸].

در تحقیقات فرانتس^{۱۶} و همکاران وی مشخص شد که برگ‌های لوبیای چشم‌بلبلی نسبت به سایه سازگاری فیزیولوژیکی پیدا کردند و میزان اشباع نور و نقطه جبران نوری در آنها کمتر از گیاهانی شده است که نور شدیدتری را دریافت می‌کنند [۳۹]. آنها از لوله‌های فلورسنت ۱۵ وات کوتاه استفاده کردند که به صورت درون کانوپی و تک‌رشته آویزان بودند و توسط لوله‌های شفاف پوشانده می‌شدند تا مانع سوختگی برگ‌ها شوند [۳۹-۴۱]. با نوردهی درون کانوپی، تولید بیومس تا دو برابر افزایش یافت [۴۰]. تحقیقات فرانتس نشان داد که با افزایش ۳۸٪ تعداد لامپ‌های درون کانوپی، میزان محصول تا ۴۵٪ افزایش می‌یابد و بالاترین بازدهی انرژی، با تغییر نور در کانوپی حاصل شد. در شرایط طبیعی، بیومس گیاهانی که در نور کم درون کانوپی رشد می‌کنند، ۵۰٪ گیاهانی است که در نور هوایی رشد می‌کنند [۳۹]. به خاطر حجمی که لامپ‌های پوشش‌دار اشغال می‌کنند، نمی‌توان تعداد لامپ را افزایش داد و اگر لامپ‌های بیشتری به کانوپی اضافه شود فضای لازم برای رشد گیاه کم می‌شود. به همین دلیل به منابع نوری کوچک با قابلیت عدم

LED کوچک به رنگ‌های مختلف کنار هم قرار می‌گیرد و یک ترکیب رنگی جدیدی ایجاد می‌شود. امواج LED یک جریان کنترل‌شده است و خروج نور با جریان ورودی متناسب است. کم نور بودن LED به طور مستقیم سبک‌کاهش توان می‌شود. این نوع منابع نوری بسیار بادوام بوده و به شوک نیز مقاوم است. پوشش‌های شفاف روی تراشه‌ها از آنها در مقابل رطوبت بالا محافظت می‌کند و سطح نور آنها کم نمی‌شود. تراشه‌های LED مانند LEDهای مجزا جرم و حجم کمی دارند و معمولاً نور را به صورت یک خط باریک از طیف رنگی گسیل می‌کنند که تعداد رنگ‌های طیف ارسالی کامل است. مؤثرترین نوع این منابع نوری، LED قرمز است که طول موج ۶۴۰nm را ساطع می‌کند و یک کوانتوم نسبتاً مؤثر برای فتوسنتز با ۹۶٪ کارایی است [۸]. تحقیقات نشان داده است که گونه‌های گیاهی مختلف مانند اسفناج [۲۶]، کاهو [۲۷-۲۸]، تربچه [۲۷]، گندم [۲۹] و سیب زمینی به خوبی در نور LED رشد می‌کنند [۳۰] و به حدود ۱۵٪ نور آبی برای رشد عادی نیاز دارند و رشد و کیفیت آنها با گیاهان رشدیافته در نور سفید برابری می‌کند [۳۱]. البته نور سبز هم می‌تواند اثرات سودمندی برای رشد و تولید گیاه داشته باشد به خصوص برای گیاهانی که برگ‌های متراکم دارند [۲۸، ۳۲].

نوردهی درون کانوپی برای رشد گیاه

از اهداف نوردهی درون کانوپی (تاج پوشش)، بهبود بازده نوردهی است که با انتشار نور در سرتاسر کانوپی یک محصول به دست می‌آید. در گیاهان پلانوفیل^{۱۲} که برگ‌های عمودی دارد با تابش نور هوایی و متوقف کردن نور درون کانوپی، برگ‌های بالایی روی برگ‌های پایینی سایه ایجاد می‌کنند که موجب از بین رفتن شبکه کربن از طریق تنفس، افتادن زود هنگام برگ‌ها و اغلب عدم تکامل جوانه‌های گل و میوه می‌شود [۳۳]. بنابراین، برگ‌های بالایی و کناری برای ایجاد یک محصول کامل فتوسنتز می‌کنند. اگر منبع نوری به درون کانوپی نوردهی کند، درصد سطح برگ‌هایی که فتوسنتز انجام می‌دهند، بیشتر می‌شود و بازده تولید بیومس نسبت به ورودی انرژی افزایش می‌یابد. به علاوه، شدت نور از یک منبع تابش مطابق قانون معکوس مربع فاصله طبق رابطه (۱) کاهش می‌یابد:

$$I = E/d^2 \quad (1)$$

I تابش روی یک سطح در فاصله d از منبع نور است که انرژی تابش E از آن ساطع می‌شود [۳۴]. بنابراین، میزان نور با افزایش فاصله بین لامپ و گیاه به سرعت افت می‌کند. پس با

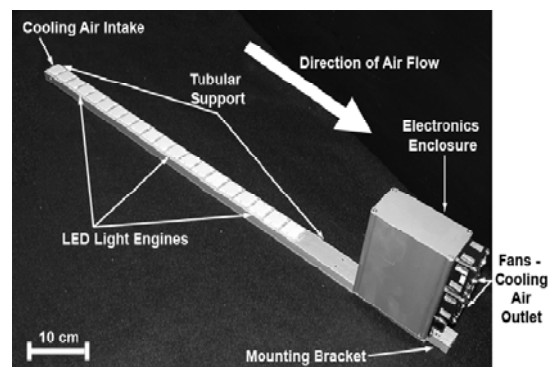
13. Stasiak
14. Tibbitts
15. Kozai
16. Frantz

12. Planophile

تولید گرما نیاز است که در صورت تغییر نور، فضا برای رشد گیاه وجود داشته باشد. LEDهایی که به صورت عمودی قرار می‌گیرند برای این موارد مناسب هستند.

آرایش نوری قابل تغییر LED

مرکز تحقیقات و آموزش ناسا برای سیستم پشتیبان حیات پیشرفته، فناوری را به وجود آورد تا حجم سیستم پشتیبان حیات را کاهش دهد [۴۲]. بنابراین، طیف‌های نوری قابل تغییر LED طراحی شد تا انرژی مورد نیاز برای رشد گیاه را کاهش دهد. در نمونه اولیه از موتور نوری اختصاصی اریبتکس^{۱۷} استفاده شد که LED ۱۰۰ به صورت تراشه روی بور دو در سطح ۶/۲۵ سانتی‌متر مربع قرار گرفته بودند که LED ۶۴ قرمز گسیل‌کننده ۶۴۰nm، ۱۶ LED آبی گسیل‌کننده ۴۴۰nm و ۲۰ LED سبز گسیل‌کننده ۵۴۰nm روی هر تراشه وجود داشت. به علاوه، به دو فتودیود نیز مجهز بود. LEDهای سبز و فتودیودها برای افزایش توانایی‌های سیستم به کار رفت. اندازه تقریباً کوچک LEDها و کنار هم قرار گرفتن آنها ترکیبی از طیف‌های یکنواخت را در گسیل فوتون فراهم‌آورد. از این‌رو، LEDها جریان‌های کنترل‌شده با رنگ‌های کنترل‌شده مجزایی بودند که نسبت آبی - قرمز و خروجی شدت نور به صورت مداوم تنظیم می‌شد. بیست عدد از این ترانس‌های نوری در طول یک خط شیاردار نصب و به یک دیوار الکترونیکی توخالی متصل شدند (۵cm×۱۲cm×۱۰cm). همچنین، دو فن در آن تعبیه شده بود. توخالی بودن این امکان را فراهم آورد که هوا در آن جریان داشته باشد و گرمای تولیدشده حذف شود (شکل ۲).



شکل ۲- سیستم نوری طراحی شده برای مطالعات فضایی.

هر سیستم نوری می‌توانست به شکل سقفی یا آویزان باشد تا بتوان در آرایش درون کانوپی گیاه آن را تنظیم کرد. به علاوه، آرایش سیستم نوری می‌توانست در شکل‌های مسطح دووجهی نیز تغییر یابد و در کانوپی بسته برای تولید نور هوایی به دارای ترانس نوری مجهز بود. در شکل ۳-الف و ۳-ب به ترتیب سیستم نوری هوایی و درون کانوپی نمایش داده شده است. این تغییر وضعیت کانوپی برای گیاهان رزت (مثل کاهو) یا راست (گندم قد کوتاه) ایده‌آل بود. ولی حتی برای گیاهان عادی نیز، سیستم نور LED در نزدیک به سطح گیاه موجب سوختن آنها نمی‌شود. ترانس‌های نوری که مستقیماً بالای هر گیاه قرار داشت به صورت خودکار تنظیم می‌شد. همچنین، زمانیکه برگ گیاهچه‌ها جوانه می‌زد، ترانس‌های درون کانوپی روشن می‌شد و فتوستتزر را افزایش می‌داد [۴۲].

شکل ۳-ج یک نمونه از نوردهی درون کانوپی را نشان می‌دهد. سیستم نوردهی دوباره به آرایش دو وجهی تغییر می‌یابد. در آزمایش هوایی، همه ترانس‌های نوری در مدت آزمایش روشن هستند، در حالی که در آزمایش‌های درون کانوپی، نورها حین رشد تغییر افزایش پیدا خواهد کرد. در شکل ۳-د سیستم نور هوایی نمایش داده شده است. گیاهانی که با این سیستم نوردهی رشد می‌کنند، محصول کمتری دارند و نسبت به گیاهانی که سیستم نوری درون کانوپی دارند، به طور متوسط ۲۵٪ کمتر رشد می‌کنند [۴۲].

مسیرهای آینده

نوعی سیستم اندازه‌گیری تبادل گازی به‌خصوص در نوردهی درون کانوپی با LED، در حال ساخت است که دارای یک لوله شیشه‌ای بوده تا میزان فتوستتزر و تنفس واقعی گیاه را در حالت نور درون کانوپی اندازه‌گیری کند. تبادلات گازی و عملکرد پارامترهای محیطی مثل سطح نور، نسبت قرمز به آبی، دی‌اکسیدکربن و دما را اندازه‌گیری می‌کند. این ابزار بهینه‌سازی نوردهی درون کانوپی و شرایط رشد را برای انواع گونه‌های گیاهی فراهم می‌کند.

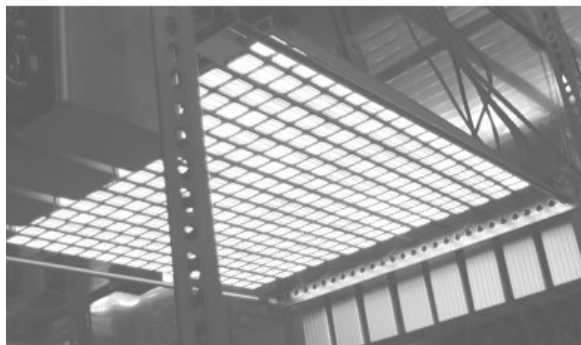
نتیجه‌گیری

برای آماده‌سازی سیستم نوری برای سیستم پشتیبان حیات، انواع مختلف منابع نوری ارزیابی شده‌اند. LEDها، به‌خصوص ترانس‌های نوری به صورت تراشه روی بور منابع نوری نسبتاً جدیدی هستند که سیستم نوری بهینه‌ای را برای رشد گیاه در سیستم پشتیبان حیات فراهم می‌کنند. از آنجا که فناوری به‌سرعت در حال پیشرفت است، بازده الکتریکی این منابع نوری نیز افزایش می‌یابد. به علاوه، انتخاب دقیق طیف مورد نظر برای

سیستم‌های الکترونیکی بانک نوری توسط شبکه‌ای به یک محفظه کنترل مرتبط است. محفظه کنترل اجازه می‌دهد تا نور LED در اختیار گیاه قرار گیرد. LEDهای آبی و قرمز، کنترل‌های مستقلی داشت و چرخه نوری مورد نظر نیز با استفاده از زمان سنج برنامه‌ریزی می‌شد [۴۲].

بهینه‌سازی سیستم نوردهی برای رشد گیاه در سیستم پشتیبان حیات

مزیت‌های LED، استفاده از طیف‌های نوری است که توانایی فتوسنتزی دارد و تولید بیومس را افزایش می‌دهد. این ویژگی منجر شده است تا هزینه رشد گیاهان در سیستم پشتیبان حیات برای ارسال به ماه و مریخ کم شود.



ب) LED های هوایی روشن

فتوسنتز، رشد و گلدهی بهینه امکان‌پذیر است. طبیعت جامد و بادوام LED، سطح ساطع‌کننده نسبتاً خنک، عمر طولانی، قابل تنظیم بودن طیف، سطح تابش و توانایی حذف گرما این نور، آن را بهترین گزینه برای سیستم پشتیبان حیات کرده است. از



الف) سیستم نوری LED درون کانوی با لامپ‌های خاموش



د) آرایش هوایی با کانوی نزدیک به لوبیای چشم بلبلی با لامپ‌های LED خاموش



ج) آرایش درون کانوی را با کانوی نزدیک به گیاهان لوبیای چشم بلبلی با لامپ‌های LED خاموش

شکل ۳- سیستم نوری LED درون کانوی.

[5] Cuello, J. L., and et al., "Evaluation of Light Transmission and Distribution Materials for Lunar and Martian Bioregenerative Life Support," *Life Support Biosphere Science*, Vol. 5, 1998, pp. 389-402.

[6] Jack, D. A., Nakamura, T., Sadler, P., and Cuello, J.L., "Evaluation of Two Fiber Optic-Based Solar Collection and Distribution Systems for Advanced Space Life Support," *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45, 2002, pp. 1547-1558.

[7] Nakamura, T., Case, J.A., and Mankamy, M., "Development of The Optical Waveguide Solar Lighting System for Space-Based Plant Growing," *Life Support Biosphere Science*, Vol. 5, 1998, pp. 205-215.

[8] Sager, J.C., and McFarlane, J.C., *Radiation. In: Plant Growth Chamber Handbook.*, (Langhans, R. W. and Tibbitts, T.W., Eds.) Iowa State University: North Central Regional Research Publication No. 340, Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station Special Report, No. 99, pp. 1-29, 1997.

مراجع

[1] Cockell, C. S., and Andraday, A. L., "The Martian and Extraterrestrial UV Radiation Environment Biological and Closed-Loop Ecosystem Considerations," *Acta Astronautica*, Vol. 44, 1999, pp. 53-62.

[2] Cockell, C. S. "The Martian and Extraterrestrial UV Radiation Environment. Part II: Further Considerations on Materials and Design Criteria for Artificial Ecosystems," *Acta Astronautica*, Vol. 49, 2001, pp. 631-640.

[3] Rontó, G., and et al., "Solar UV Irradiation Conditions on the Surface of Mars," *Photochemistry photobiology*, Vol. 77, 2003, pp. 34-40.

[4] Horneck, G., and et al., "Critical Issues in Connection With Human Missions to Mars: Protection of and from the Martian Environment," *Advance Space Research*, Vol. 31, 2003, pp. 87-95.

- [23] Masuda, T., and et al., "Development of A 1-Week Cycle Menu for An Advanced Life Support System (ALSS) Utilizing Practical Biomass Production Data From The Closed Ecology Experiment Facilities (CEEf)," *Habitation*, Vol. 10, 2005, pp. 87-97.
- [24] Nitta, K., "The Mini-Earth Facility and Present Status of Habitation Experiment Program," *Advance Space Research*, Vol. 35, 2005, pp. 1531-1538.
- [25] Tennessen, D.J., and Ciolkosz, D.E., "Towards Efficient Conversion of Electricity Into Edible Biomass In Crop Production Systems: A Transgenic Approach," *Life Support Biosphere Science*, Vol. 5, 1998, 217-233.
- [26] Goins, G.D., and Yorio, N.C., "Spinach Growth and Development Under Innovative Narrow- and Broad-spectrum Lighting Sources," *SAE Technical Paper # 2000-01-2290*, 2000.
- [27] Goins, G.D. and et al., "Salad Crop Production Under Different Wavelengths of Red Light-Emitting Diodes (LEDs)," *SAE Technical Paper # 2001-01-2422*, 2001.
- [28] Kim, H.H., Goins, G.D., Wheeler, R.M., and Sager, J.C., "Green-Light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth Under Red- and Blue-Light-Emitting Diodes," *Horticulture Science*, Vol. 39, 2004, pp. 1617-1622.
- [29] Goins, G.D., Yorio, N.C., Sanwo, M.M., and Brown, C.S., "Photomorphogenesis, Photosynthesis, and Seed Yield of Wheat Plants Grown Under Red Light-Emitting Diodes (LEDs) with and without Supplemental Blue lighting," *Journal Experimental Botany*, Vol. 48, 1997, pp. 1407-1413.
- [30] Miyashita, Y., Kitaya, Y., Kozai, T., and Kimura, T., "Effects of Red and Far-Red Light on The Growth and Morphology of Potato Plantlets *In Vitro*: Using Light Emitting Diode as a Light Source for Micropropagation," *Acta Horticulturae*, Vol. 393, 1995, pp. 189-194.
- [31] Yorio, N. z.C., and et al., "Blue Light Requirements for Crop Plants Used in Bioregenerative Life Support Systems," *Life Support Biosphere Science*, Vol. 5, 1998, pp. 119-128.
- [32] Kim, H. H., et al., "Light-Emitting Diodes As An Illumination Source for Plants: A Review of Research at Kennedy Space Center," *Habitation*, Vol. 10, 2005, pp. 71-78.
- [33] Ohler, T. A., Nielsen, S. S., and Mitchell, C. A., "Varying Plant Density and Harvest Time to Optimize Cowpea Leaf Yield and Nutrient Content," *Horticulture Science*, Vol. 31, 1996, pp. 193-197.
- [34] Bickford, E. D., and Dunn, S., *Lighting for Plant Growth*, The Kent State University Press, pp. 1-221, 1972.
- [35] Stasiak, M. A., Côté, R., Dixon, M., and Grodzinski, B., "Increasing Plant Productivity in Closed Environments with Inner Canopy Illumination," *Life Support Biosphere Science*, Vol. 5, 1998, pp. 175-181.
- [36] Tibbitts, T.W., Cao, W., and Wheeler, R. M., *Growth of Potatoes for CELSS*. NASA Contractor Report 177646. Ames Research Center, Moffett Field, CA. 1994b.
- [37] Hayashi, M., Fujita, N., Kitaya, Y., Kozai, T., "Effect of Sideward Lighting on The Growth of
- [9] Deitzer, G. F., Hayes, R., and Jabben, M., "Kinetics and Time Dependence of The Effect of Far Red Light n The Photoperiodic Induction of Flowering in Wintex Barley," *Plant Physiology*, Vol. 64, 1979, pp. 1015-1021.
- [10] Hoenecke, M. E., Bula, R.J., Tibbitts, T.W., "Importance of Blue Photon Levels for Lettuce Seedlings Grown Under Red-Light-Emitting Diodes," *Horticultural Science*, Vol. 27, 1992, pp. 427-430.
- [11] Goins, G. D., Yorio, N.C., Sanwo, M.M., Brown, C.S., "Photomorphogenesis, Photosynthesis, and Seed Yield of Wheat Plants Grown Under Red Light-Emitting Diodes (LEDs) With and Without Supplemental Blue Lighting," *Journal of Experimental Botany*, Vol. 48, 1997, pp. 1407-1413.
- [12] Brown, C. S., Schuerger, A.C., Sager, J. C., "Growth and Photomorphogenesis of Pepper Plants Under Red Light-emitting Diodes with Supplemental Blue or Far-Red Lighting," *Journal of American Society Horticultural Science*, Vol. 120, 1995, pp. 808-813.
- [13] *Osram Sylvania. Quicktronic Helios T8 dimming*. [On-line]. Available: [http://www.sylvania.com/BusinessProducts/Lighting for Business/ Products/Systems/Dimming and Dali Ballasts/](http://www.sylvania.com/BusinessProducts/Lighting%20for%20Business/Products/Systems/Dimming%20and%20Dali%20Ballasts/), 2004.
- [14] Bubenheim, D. L., Sargis, R., and Wilson, D., "Spectral Changes in Metal Halide and High-Pressure Sodium Lamps Equipped with Electronic Dimming," *Horticultural Science*, Vol. 30, 1995, pp. 1086-1089.
- [15] Massa, and G. D. et al., "Development and Testing of an Efficient LED Intracanopy Lighting Design for Minimizing Equivalent System Mass in An Advanced Life Support System," *Gravity Space Biology Bull*, Vol. 18, 2005b, pp. 87-88.
- [16] Wheeler, R. M., and et al., *Crop Production for Advanced Life Support Systems – Observations from The Kennedy Space Center Breadboard Project*, NASA Kennedy Space Center: *NASA Technical Memorandum TM-2003-211184*, pp. 1-25, 2003.
- [17] Hopkins, B., *Nutrition Support Dietetics, 2nd Edition* (Gattschlich, M., Matarese, L., Shrouts, E., Eds.) Silver Spring, MD: American Society for Parenteral and Enteral Nutrition, pp. 63, 1993.
- [18] Mitchell, C. A., and et al., *Costs of Providing Edible Biomass for A Balanced Vegetarian Diet in A Controlled Ecological Life-Support System*, *Plants in Space Biology* (Suge, H. Ed.) Sendai, Japan: Tohoku University press, pp. 245-254, 1996.
- [19] Downs, R. J., and Hellmers, H., *Environment and the Experimental Control of Plant Growth*, London: Academic Press, pp. 31-82, 1978.
- [20] Gitelson, I. I., Lisovsky, G. M., and MacElroy, R. D., *Manmade Closed Ecological Systems*, New York: Taylor and Francis, pp. 31-309, 2003.
- [21] Wheeler, R.M., "Gas-Exchange Measurements Using A Large, Closed Plant Growth Chamber," *Horticultural Science*, Vol. 27, 1992, pp. 777-780.
- [22] *Lawson, M. Lunar-Mars Life Support Test Project*. [On-line]. Available: [http:// advlifefsupport.jsc.nasa.gov/ehti3/index.html](http://advlifefsupport.jsc.nasa.gov/ehti3/index.html), 2004.

- Capture, Productivity, and Leaf Senescence in Cowpea Canopies,” J. American Society Horticulture Science, Vol. 125, 2000, pp. 694-701.
- [41] Frantz, J. M., Joly, R. J., and Mitchell, C. A., “Intracanopy Lighting Reduces Electrical Energy Utilization by Closed Cowpea Stands,” Life Support Biosphere Science, Vol. 7, 2001, pp. 283-290.
- [42] Drysdale, A., “Computer Modeling for Advanced Life Support System Analysis,” Life Support Biosphere Science, Vol. 4, 1997, pp. 21-29.
- Potato Plantlets in Vitro,” Horticulture Science, Vol. 319, 1992, pp. 163-166.
- [38] Kozai, T., et al., “A Sideward Lighting System Using Diffusive Optical Fibers for Production of Vigorous Micropropagated Plantlets,” Horticulture Science, Vol. 319, 1992, pp. 237-242.
- [39] Frantz, J. M., Chun, C., Joly, R. J., and Mitchell, C. A., “Intracanopy Lighting of Cowpea Canopies in Controlled Environment,” Life Support Biosphere Science, Vol. 5, 1998, pp. 183-189.
- [40] Frantz, J. M., Joly, R. J., and Mitchell, C. A., “Intracanopy Lighting Influences Radiation