

# لامپ‌های LED:

## تحولی در سیستم رو شنایی گلخانه‌ها

ابوالفضل لطفی

استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

سیدمهدی سیدی\*

استادیار پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

### چکیده

نور عامل مهمی برای رشد و نمو گیاهان است. در مناطقی که در آن منبع نور طبیعی خورشید برای رشد گیاهان کافی نیست، از منابع نور مکمل استفاده می‌شود. منابع نور سنتی مانند لامپ سدیم فشار بالا (HPS) و دیگر لامپ‌های متال هالید نه تنها کارایی بالایی ندارند، بلکه گرمای تابش بالایی نیز تولید می‌کنند. راه‌حل‌های جدید برای استفاده از سیستم‌های نوری کارآمد به لحاظ انرژی در گلخانه‌ها بایستی توسعه یابند. تحولات اخیر در زمینه فناوری منابع نور مصنوعی، افق جدیدی را برای سیستم‌های نوری بسیار پایدار و کارآمد در قالب لامپ‌های LED برای روشنایی گلخانه‌ها باز کرده است. در این مقاله به بررسی کارایی لامپ‌های LED به جای منابع سنتی در گلخانه‌ها پرداخته شده است. در یک بررسی مقایسه‌ای در راستای تجزیه و تحلیل اقتصادی از لامپ‌های سنتی و لامپ‌های LED نشان داده شده است که استفاده از لامپ‌های LED با کاهش هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی در درازمدت (با توجه به اینکه لامپ‌های LED بهره‌وری انرژی بالایی داشته و هزینه تعمیر و نگهداری آن پایین و عمر مفید آن طولانی است) نسبت به نمونه‌های سنتی بسیار مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. به منظور بررسی پاسخ گونه‌های خاص گیاهی به طول موج‌های مختلف LED به عنوان یک جایگزین مناسب برای منابع نوری، مطالعه جامعی صورت گرفته است. با این حال مطالعات علمی دقیق‌تری برای درک اثر طیف‌های مختلف نوری تولید شده توسط لامپ‌های LED در فیزیولوژی گیاهان و نوآوری‌های فنی برای طراحی و ارائه‌ی منبع نور کارآمد به لحاظ انرژی با طیف مناسب برای رشد مطلوب گونه‌های مختلف گیاهی مورد نیاز است.

### واژه‌های کلیدی

انرژی، رشد گیاه، گلخانه، لامپ سدیم فشار بالا (HPS)، لامپ LED، محصولات کشاورزی و نور.

## ۱. مقدمه

فناوری لامپ‌های LED (Light Limited Diode) اساساً رویکرد متفاوت و کارآمدی در مصرف انرژی در صنعت گلخانه نسبت به لامپ سدیم فشار بالا (HPS) که در حال حاضر در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد در پیش گرفته است (Mitchell et al., 2012: 6; Morrow, 2008: 1947). LED یک نوع از دیویدهای نیمه‌هادی بوده که اجازه کنترل ترکیب طیف و شدت نور را در جهت رشد و توسعه مورفولوژی (شکل‌سناسی) گیاه و در فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف مانند گلدهی یا بهره‌وری فتوسنتز فراهم می‌آورد (Yeh & Chung, 2009: 2175). LEDها توانایی تولید میزان بالای نور و تولید گرمای تابشی کم را داشته و برای سال‌ها نور خروجی اثربخش خود را حفظ می‌کنند. این در حالی است که در لامپ‌های رشته‌ای یا فلورسنت علاوه بر اینکه می‌بایست به‌صورت دوره‌ای تعویض صورت گیرد، مصرف مقدار قابل توجه انرژی الکتریکی گرمای زیادی را نیز تولید می‌کند (Tennessen et al., 1994: 85). لامپ‌های LED به دلیل نداشتن رشته مانند لامپ‌های رشته‌ای و فلورسنت نمی‌سوزند و با توجه به تولید گرمای تابشی پایین، می‌توانند نزدیک به گیاه قرار گرفته و میزان نور بالایی را تولید کنند (Barta et al., 1992: 141).

LED یک دستگاه حالت جامد است که می‌تواند به راحتی با سیستم‌های کنترل دیجیتال یکپارچه شده و در نتیجه برنامه‌های روشنایی پیچیده مانند شدت یا ترکیب طیفی مختلف در مراحل نمو مختلف گیاه را امکان‌پذیر و تسهیل نماید. نور به روش‌های بسیار پیچیده‌ای فیزیولوژی و رشد گیاهان (گلدهی و کارایی فتوسنتزی) را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Olle & Virsile, 2013: 223). کیفیت و کمیت نور سیگنالینگ گیرنده‌های نوری خاص (فیتوکروم‌ها، سیتوکروم‌ها و فیتوتروپین‌ها) که بیان تعداد زیادی از ژن‌ها را تغییر می‌دهند تحت تأثیر قرار می‌دهد (Li & Kubota, 2009: 59; Lin et al., 2013: 86).

استفاده از LED به‌عنوان منبع نوری نه تنها می‌تواند برای بهینه‌سازی کیفیت نور برای گیاهان و فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف آنها مؤثر باشد، بلکه برای ایجاد یک سیستم کنترل دیجیتالی و یک سیستم روشنایی کارآمد به لحاظ انرژی نیز می‌تواند مفید واقع گردد. هزینه‌های بالای سیستم‌های روشنایی

LED از جنبه‌های مهم به تأخیر افتادن استفاده از این فناوری در سیستم روشنایی گلخانه‌ها است. با این حال توسعه این فناوری و تولید انبوه (براساس تقاضای بالا عمومی و خصوصاً صنایع گلخانه‌ای)، سرمایه و هزینه‌های عملیاتی استفاده از این لامپ‌ها را در آینده به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد داد (Morrow, 2008: 1947; Massa & Kim, 2008: 1951; Vänninen et al., 2010: 393). طراحی صحیح سیستم نوری LED می‌تواند کارایی عملکرد را بسیار افزایش داده و طول عمر فراتر از هر منبع نوری را فراهم سازد (Bourget, 2008: 1944). تحقیقات روی منابع روشنایی LED برای رشد گیاهان تقریباً به مدت ۲ دهه است که آغاز شده است.

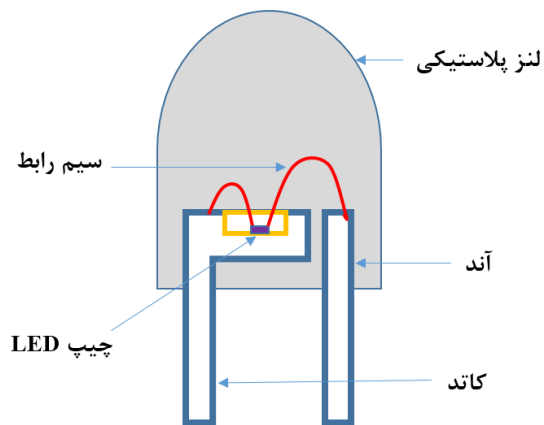
روشنایی LED در گیاهان مختلف نتایج خوبی را نشان داده است که نظر به بهره‌وری حداکثر و کیفیت غذای مطلوب می‌توان راه را برای گسترش پذیرش فناوری LED در روشنایی گلخانه در آینده هموار کرد. این مقاله خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده روی گیاهان (فتوسنتز، رشد، ارزش غذایی و گلدهی) با به کار بردن سیستم‌های نوری LED را فراهم کرده و روی پاسخ به سوالات مهم زیر تمرکز نموده است:

- چرا باید سیستم‌های روشنایی LED نسبت به منابع سنتی ترجیح داده شوند؟
- چرا باید از ترکیب طیفی و به‌صورت قابل تنظیم استفاده کرد؟
- چالش‌های عمده برای سیستم‌های نوری LED چیست؟

## ۲. ساختار و خصوصیات لامپ‌های LED

انرژی یکی از عوامل مهم در صنعت گلخانه است که سبب می‌شود حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل هزینه‌های تولید به این بخش اختصاص یابد (Langton et al., 2006: 1). روشنایی متناسب با محصول یک ضرورت در صنعت گلخانه است، به‌خصوص در مناطقی که دوره نوری فصلی (طول روز طبیعی) در نوسان بوده و نور کافی برای رشد مطلوب گیاه وجود ندارد.

امروزه لامپ‌های سدیم فشار بالا (HPS) بیشترین منبع نوری مورد استفاده در صنعت گلخانه را تشکیل می‌دهند. لامپ‌های سدیم فشار بالا در درجه حرارت بالا (بیشتر از ۲۰۰ درجه) کار



شکل ۱. ساختار کلیدی یک لامپ LED

تا آنجا که به بهره‌وری مربوط می‌شود لامپ‌های رشته‌ای کمتر از ۵ درصد انرژی الکتریکی ورودی را به نوری تبدیل می‌کند در حالی که LEDهای تجاری با کارایی بیش از ۵۰ درصد، پتانسیل بسیار عظیمی را در کارایی مصرف انرژی در تولید روشنایی دارند (Keefe, 2007: 11). LEDها می‌توانند مزایای مختلفی را در مقابل منابع نوری سنتی برای صنعت گلخانه‌ای به‌همراه داشته باشند (Massa & Kim, 2008: 1951; Vänninen et al., 2010: 393):

۱. کاهش مصرف انرژی تا ۷۰ درصد در مقایسه با منابع نوری سنتی؛
۲. تعویض سریع و ماندگاری بالا؛
۳. کاهش مصرف کابل و در نتیجه کاهش هزینه و وزن؛
۴. کارایی کوانتومی نسبی بالا (RQE): نور قرمز بالاترین RQE را داشته و بدین معنی است که بالاترین کارایی را در فتوسنتز دارد، نور آبی ۷۰ الی ۷۵ درصد کارایی نور قرمز را دارد؛
۵. درجه حرارت پایدار در داخل اتاقک رشد و گلخانه؛
۶. قابلیت کنترل ترکیب طیفی از طول موج‌های آبی، سبز و قرمز و مادون قرمز؛
۷. کاهش تنش گرما برای گیاهان؛
۸. کاهش دور آبیاری و تعمیر نگهداری تهویه؛
۹. طول عمر، قابلیت اطمینان و اندازه کوچک.

### ۳. چگونه نور روی رشد گیاهان تأثیر می‌گذارد؟

گیاهان در سراسر طول عمر خود از جوانه زدن، گلدهی و تولید بذر به نور نیاز دارند. سه پارامتر اصلی نور که در صنایع گلخانه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: کیفیت، کمیت و مدت زمان نور. هر سه پارامتر اثرات متفاوتی روی عملکرد گیاه دارند (Nishio, 2000: 539).

می‌کنند، در نتیجه مقدار قابل توجهی حرارت تابشی (قرمز دور) در محیط اطراف آزاد می‌شود (Opdam et al., 2005: 517). به همین دلیل لامپ‌های سدیم فشار بالا نمی‌توانند به میزان کافی به گیاه نزدیک شده و بایستی سیستم تهویه برای جلوگیری از افزایش بیش از حد دما در نزدیک گیاه فراهم باشد. بنابراین فناوری جدیدی که به‌طور قابل توجهی مصرف برق و تولید گرمای تابشی را برای روشنایی در گلخانه کاهش داده و باعث افزایش کیفیت محصول (رشد و ارزش غذایی) شود، علاقه‌مندی زیاد صنعت گلخانه را برانگیخته است (Leperen et al., 2008: 1407).

LEDها نشان‌دهنده‌ی یک رویکرد کارآمد انرژی برای روشنایی گلخانه‌ها هستند که مزایای فنی بسیار بیشتری نسبت به منابع نوری سنتی با رشته‌های شکننده، الکتروود یا لامپ‌های پر شده با گازهای تحت فشار دارند (Bourget, 2008: 1944). LEDها همچنین دارای پتانسیل بسیار مناسبی برای ایفای نقش‌های مختلف در روشنایی گلخانه‌ها هستند.

LED به معنای دیود ساطع‌کننده نور است. دیودهای ساطع‌کننده نور در واقع جزو خانواده‌ی دیودها هستند؛ دیودها نیز زیرگروه نیمه‌هادی‌ها به‌شمار می‌آیند. خاصیتی که LEDها را از سایر نیمه‌هادی‌ها متمایز می‌سازد این است که با گذر جریان از آنها مقداری انرژی به صورت نور از آنها ساطع می‌شود. ساختار کلیدی یک LED شامل یک تراشه (ماده‌ی نیمه‌هادی ساطع‌کننده نور)، یک قالب سرب به‌عنوان سرپوش و کپسولی که سرپوش را حفاظت می‌کند می‌شود (شکل ۱) (Yeh & Chung, 2009: 2175). توصیف دقیق مکانیک کوانتوم کار LEDها فراتر از این مقاله است. شایان ذکر است که LEDها می‌توانند نوری با طیف وسیع (سفید) یا محدوده طول موج خاص (رنگی) بنا به برنامه مورد نظر به‌عنوان مثال برای پاسخ به گیاهان تولید نمایند (Nanya et al., 2012: 261). در LEDها هدر رفت انرژی به‌صورت حرارت بسیار کم بوده که این خصوصیت برای روشنایی‌های با شدت بالا بسیار مهم است، زیرا منبع نور را می‌توان تا حد ممکن به سطح محصول، بدون خطر گرمای بیش از حد و سوخت گیاهان، نزدیک کرد (Bourget, 2008: 1944).

اوزون زمین مسدود شده و به همین دلیل به سطح زمین نمی‌رسد.

۲۸۰ تا ۳۱۵ نانومتر (اشعه ماوراء بنفش B): این بخش از نور خیلی مضر نبوده، اما باعث رنگ‌پریدگی گیاهان می‌شود.

۳۱۵ تا ۳۸۰ نانومتر (ماوراء بنفش A): این محدوده هیچ اثر مثبت یا منفی روی رشد گیاه ندارد.

۳۸۰ تا ۴۰۰ نانومتر (ماوراء بنفش A/ نور مرئی): آغاز طیف نور مرئی بوده و در آن روند جذب نور توسط رنگدانه‌های گیاهی (کلروفیل و کاروتنوئید) آغاز می‌شود.

۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر (نور مرئی): شامل نور آبی، بنفش و سبز می‌باشد و بیشینه جذب به وسیله کلروفیل در این محدوده اتفاق می‌افتد که تأثیر زیادی روی رشد رویشی و فتوسنتز دارد.

۵۲۰ تا ۶۱۰ نانومتر (نور مرئی): این طیف شامل باندهای سبز، زرد و نارنجی می‌باشد. در این محدوده جذب کمتری توسط رنگدانه‌های گیاه صورت می‌گیرد و تأثیر کمتری نیز بر رشد رویشی و فتوسنتز گیاه دارد.

۶۱۰ تا ۷۲۰ نانومتر (نور مرئی): شامل نور قرمز بوده و مقدار زیادی از جذب در این محدوده صورت می‌گیرد.

۷۲۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر (مادون قرمز): جوانه‌زنی و گلدهی به وسیله این محدوده تحت تأثیر قرار می‌گیرد، اما جذب در این محدوده محدود می‌شود.

بیش از ۱۰۰۰ نانومتر (فرو سرخ): همه جذب در این محدوده به گرما تبدیل می‌شود.

محققان در سراسر جهان در حال بررسی و آزمایش ترکیبات مختلف طیف نوری برای بهینه‌سازی رشد گیاه هستند.

#### ۴. LED به عنوان منبع نوری گیاهان

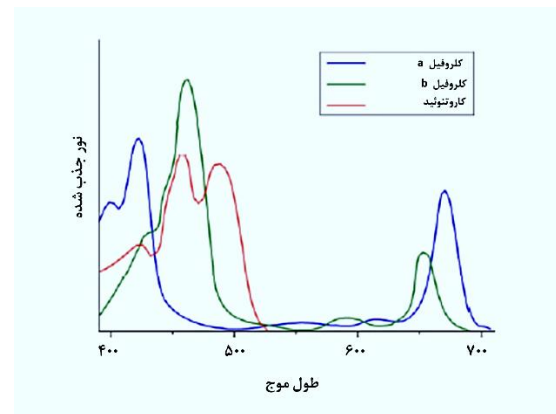
LEDها به عنوان منبع نوری گیاهی بیش از ۲۰ سال پیش برای پرورش کاهو زیر نور LED قرمز و لامپ‌های فلورسنت آبی مورد استفاده قرار گرفت (Bula et al., 1991: 203). چندین گزارش رشد موفق گیاهان زیر نور LED را تأیید می‌کنند (Tanaka et al., 2000: 5344; Yanagi & Okamoto, 1997: 223). ترکیب‌های مختلف طیفی به منظور مطالعه اثر نور بر رشد و نمو گیاهان استفاده شده و حاکی از آن بوده است که گیاهان درجه بالایی از انعطاف‌پذیری فیزیولوژیکی و شکل‌شناسی را به تغییرات کیفیت طیف نور نشان می‌دهند

مقدار نور (شدت): مقدار یا شدت نور پارامتر اصلی است که روی فتوسنتز (یک واکنش فتوشیمیایی کلروپلاست‌های سلول‌های گیاهی که در آن انرژی نور برای تبدیل CO<sub>2</sub> اتمسفر بر کربوهیدرات استفاده می‌شود) تأثیر می‌گذارد.

کیفیت نور (توزیع طیفی): کیفیت نور اشاره به توزیع طیفی تابش به عنوان مثال مناطق طول موج مرئی یا نامرئی یا قرمز و سبز و آبی و غیره دارد. برای فتوسنتز گیاهان به نور قرمز و آبی پاسخ می‌دهند. توزیع طیف نور همچنین روی شکل یا گلدهی بوته تأثیر می‌گذارد.

مدت زمان نور (روز): دوره نوری عمدتاً روی گلدهی تأثیر می‌گذارد. زمان گلدهی در گیاهان را می‌توان با تنظیم دوره نوری کنترل کرد.

گیاهان همه طول موج‌های نور (نور خورشید) را جذب نمی‌کنند به عبارت دیگر گیاهان در جذب طول موج مناسب با توجه به نیازشان بسیار گزینشی عمل می‌کنند، مهم‌ترین بخش از طیف نوری برای گیاهان ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است که به عنوان تابش فعال فتوسنتزی (PAR) شناخته شده است. این محدوده مربوط به بیشتر و کمتر طیف مرئی برای چشم انسان است (Chen, 2014). کلروفیل (کلروفیل a و b) نقش مهمی را در فتوسنتز ایفا می‌کنند. در گیاهان رنگدانه‌های فتوسنتزی دیگری نیز مانند کاروتنوئیدها، بتاکاروتن، لیکوپین و غیره وجود دارند که در جذب نور شرکت کرده و تأثیر مهمی در فتوسنتز دارند (شکل ۲).



شکل ۲. طیف جذبی رنگ دانه‌های گیاهی

طیف تابش خورشیدی به طور عمده شامل سه بخش است: اشعه ماوراء بنفش UV، نور مرئی و قرمز دور.

۲۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر (ماوراء بنفش C): این بخش از طیف به دلیل رسمیت بالای آن برای گیاهان مضر است. UVC توسط لایه

نشان داده شده است. Miznue و همکاران (۲۰۱۱) و لی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که LEDهای آبی (۴۴۰ و ۴۷۶ نانومتر) در ترکیب با LEDهای قرمز در گیاه کلم چینی باعث افزایش میزان کلروفیل می‌گردد (Li et al., 2012: 262 & Goins Mizuno et al., 2011: 179) و همکاران (۱۹۹۷) گزارش دادند که گندم می‌تواند تحت نور LED قرمز به تنهایی چرخه زندگی خود را کامل کند ولی گیاهان در معرفی LED قرمز و با مقداری نور آبی گیاهان بزرگتر و مقدار بیشتری از دانه‌های کامل را تولید خواهند کرد (Goins et al., 2001: 1). آزمایشات مشابهی نشان داده است که ارزش غذایی و بهبود محتوای آنتی‌اکسیدان در گیاهان سبز با افزایش کاروتنوئید (Li et al., 2008: 2243)، ویتامین C (Lefsrud et al., 2008: 2243) و (Stutte et al., 2009: 79) آنتوسیانین (2012: 262) پل‌فنل‌ها (Johkan et al., 2012: 128) افزایش می‌یابد. چندین گزارش حاکی از آن بوده است که پاسخ گیاهان (مانند رشد، زمان گلدهی و متابولیت‌های ثانویه) متناسب با کیفیت نور اختصاصی گونه می‌باشد. جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات مختلف را که روی گونه‌های مختلف گیاهی برای مطالعه تأثیر طول موج‌های خاص (با به کار بردن LEDها به عنوان منبع نور) بر فیزیولوژی گیاهان انجام شده است نشان می‌دهد.

نور سبز نیز به رشد و نمو گیاه کمک می‌کند. این موضوع با چندین آزمایش تأیید شده است. Johkom و همکاران (۲۰۱۲) که LEDهای سبز با PPF بالا ( $300\mu\text{molm}^{-2}\text{S}^{-1}$ ) برای رشد کاهو موثرترین هستند (Johkan et al., 2012: 128). Nrichovas و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که LEDهای با نور سبز (۵۰۵ تا ۵۳۰ نانومتر) در ترکیب با لامپ‌های HPS بهترین کمک را به رشد خیار می‌کنند (Novičkovas et al., 2012: 723). Folta (۲۰۰۴) تأثیر نور LED سبز (۵۲۵ نانومتر) بر جوانه‌زنی گیاهچه ارابیدوپسیس را مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که نهال‌های رشد یافته زیر نور LEDهای سبز و قرمز و آبی طولی‌تر از آنها می‌باشند که زیر نور قرمز (۶۳۰ نانومتر) و آبی (۴۷۰ نانومتر) به تنهایی رشد کرده‌اند (Folta, 2004: 1407). LED آبی و قرمز تحت مکمل نور سبز رشد کاهو را بهبود می‌بخشد (Kim et al. 2004: 1617). نور سبز به تنهایی برای رشد گیاهان کافی نبوده، زیرا کمترین میزان جذب توسط گیاهان را دارد اما وقتی که در ترکیب با نورهای

(Barreiro et al., 1992: 97; Sims & Percy Nishio, 2000: 539). نور قرمز (۶۱۰ تا ۷۲۰ نانومتر) برای نمو دستگاه فتوسنتزی و فتوسنتز لازم است در حالی که نور آبی (۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر) نیز برای سنتز کلروفیل، نمو کلروپلاست، باز شدن روزنه‌ها و فتومورفوژن اهمیت دارد (Akoyunoglou & Anni, 1984: 397; Senger, 1982: 911).

چندین آزمایش باغبانی روی گیاه سیب زمینی، تربچه (Yorio et al., 2001: 380) و کاهو (Stutte et al., 2009: 79) نشان داده که نور آبی (۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر) برای زیست توده و سطح برگ بیشتر لازم است، با این حال طول موج‌های مختلف از رنگ‌های قرمز (۶۶۰، ۶۷۰، ۶۸۰، ۶۹۰ نانومتر) و آبی (۴۳۰، ۴۴۰، ۴۶۰، ۴۷۵ نانومتر) ممکن است اثرات ناهمگونی روی گیاهان مختلف بسته به گونه گیاهی داشته باشد (Saebo et al., 1982: 911; Goins et al., 2001: 1; Li et al., 2012: 262). نشان داده شده که نور LED مادون قرمز (۷۰۰ تا ۷۲۵ نانومتر) که فراتر از PAR است برای حمایت از رشد و فتوسنتز لازم است (Stutte et al., 2009: 79 & Goins et al., 2001: 1).

همان‌طور که توسط Goins و همکاران (۲۰۰۱) گزارش شده، عملکرد زیست توده کاهو توسط LED قرمز با طول موج ۶۶۰ تا ۶۹۰ نانومتر افزایش یافته است (Goins et al., 2001: 1). Stutte و همکاران (۲۰۰۹) اثر LED با نور قرمز (۶۴۰ نانومتر) را با LED مادون قرمز (۷۳۰ نانومتر) در فیزیولوژی برگ کاهو مقایسه کردند (Stutte et al., 2009: 79). نتایج نشان داد که استفاده از مادون قرمز (۷۳۰ نانومتر) با قرمز (۶۴۰ نانومتر) شده باعث افزایش طول برگ و در مجموع زیست توده شد. در حالی که محتوای آنتوسیانین و پتانسیل آنتی‌اکسیدان آن کاهش داد، Mizuno و همکاران (۲۰۱۱) LED قرمز (۶۴۰ نانومتر) را به عنوان تنها منبع نوری برای کلم برگ قرمز مورد استفاده قرار دادند و نتایج آنها نشان از افزایش محتوای آنتوسیانین در آن داشت (Mizuno et al., 2011: 179). علاوه بر این، قرمز دور (۷۳۵ نانومتر) با نور LED قرمز (۶۶۰ نانومتر) روی لفل‌دلمه گیاهان بلندتر و با زیست توده ساقه بیشتری نسبت به نور LED قرمز به تنهایی تولید می‌کند (Brown et al., 1995: 808). اثرات مثبت نور آبی (۴۰۰-۵۰۰) در ترکیب با نور LED قرمز رنگ روی رشد گیاهان و ارزش غذایی آنها در چندین آزمایش

ارائه طول موج بهینه رشد گونه‌های مختلف گیاهی بسیار مفید است. یافته‌های مطالعات پاسخ گیاهان به طیف‌های نوری مختلف می‌تواند در طراحی سیستم نوری کارآمد برای گونه‌های خاص گیاهی کاربرد داشته باشد.

قرمز، آبی یا فرورسرخ نور سبز به کار برده می‌شود مطمئناً تأثیرات فیزیولوژیکی مهمی را نشان می‌دهد. تحقیقات بیشتر برای مطالعه سطح مورد نیازی از فوتون سبز برای رشد مطلوب گیاه مورد نیاز است. آزمایش‌های با طول موج‌های مختلف سبز، قرمز، آبی و قرمز دور (که به وسیله LEDها ارائه می‌شوند) برای

جدول ۱. تأثیر منابع مختلف نور LED بر فیزیولوژی برخی از گیاهان

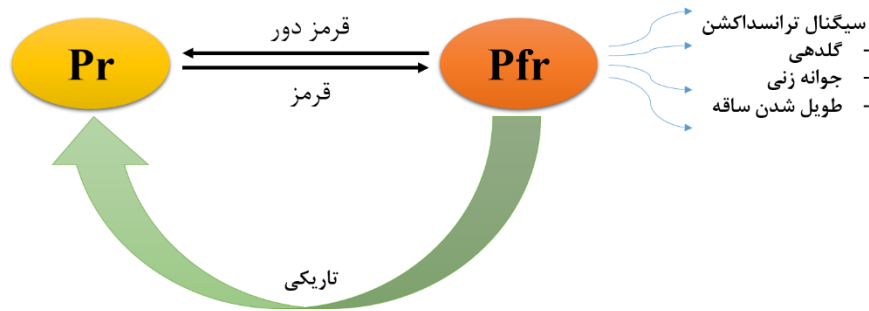
منبع	تأثیر روی فیزیولوژی گیاهان	منبع نور	گیاه
Tarakanov et al., 2012: 171	تأخیر در گلدهی در مقایسه با ترکیب ۶۳۵ نانومتر + ۴۶۰ نانومتر	LED قرمز (۶۳۵ و ۶۶۰ نانومتر) LED آبی (۴۶۰ نانومتر)	خردل هندی
Li et al., 2012: 262	افزایش محتوای آنتوسیانین	LED قرمز (۶۶۰ نانومتر)	کلم
Li & Kubota, 2009: 59	افزایش ۶ درصدی محتوای فنول	LED قرمز (۶۵۸ نانومتر)	کاهو
Lu et al., 2012: 63	افزایش عملکرد گوجه	LED قرمز (۶۶۰ نانومتر)	گوجه
Lefsrud et al., 2008: 2234	افزایش آنتی‌اکسیدان Lutein و محتوای کلروفیل a, b	LED قرمز (۶۴۰ نانومتر) پیش درمانی با نور سفید فلورسنت	کلم
Samuolienė et al., 2009: 1857	کاهش محتوای نیترات	LED قرمز (۶۳۸ نانومتر) و نور طبیعی	کاهو، پیاز سبز
Bliznikas et al., 2012: 85	افزایش محتوای ویتامین C در خردل، اسفناج و پیازچه	LED قرمز (۶۳۸ نانومتر) با لامپ HPS	خردل سفید، اسفناج، پیاز سبز
Samuolienė et al., 2012: 701	افزایش ۲۸/۵ درصدی در محتوای فنل کل ۳۳/۵ درصدی در توکوفنول‌ها ۵۲/۵ درصدی در قند ۱۴/۵ درصدی در ظرفیت آنتی‌اکسیدانی اما کاهش در محتوای ویتامین C	LED قرمز (۶۳۸ نانومتر) با لامپ HPS	کاهو
Samuolienė et al., 2011: 271	افزایش غلظت نیترات در نو برگ سبز کاهو (۱۲/۵ درصد) و کاهش در برگ قرمز (۵۶/۲ درصد) و برگ سبز کاهو (۲۰/۰ درصد)	LED قرمز (۶۳۰ نانومتر) با لامپ HPS	کاهو
Žukauskas et al., 2011: 291	افزایش فنل کل	LED قرمز (۶۳۰ نانومتر) با لامپ HPS	کاهو
Brown et al., 1995: 808	با افزودن نور مادون قرمز، افزایش در ارتفاع گیاهان و زیست توده ساقه	قرمز (۶۶۰ نانومتر) و قرمز دور (۷۳۵ نانومتر) کل PPF در ۳۰۰ میکرومول نگهداری می‌شوند	فلفل شیرین
Stutte et al., 2009:79	کل زیست توده افزایش یافته اما آنتوسیانین و ظرفیت آنتی‌اکسیدان کاهش یافته	LED قرمز (۶۴۰ نانومتر) و قرمز دور (۷۳۰ نانومتر)	کاهو قرمز
Stutte et al., 2009:79	افزایش در محتوای آنتوسیانین، آنتی‌اکسیدان بالقوه و سطح برگ	LED قرمز (۶۴۰ نانومتر) با LED آبی (۴۴۰ نانومتر)	کاهو قرمز

Lu et al., 2012:63	افزایش فتوسنتز خالص و تعداد روزنه در هر میلی‌متر	ترکیب LED آبی با LEDهای قرمز و سبز، تمام PPF نگهداری شده در ۳۰۰ میکرومول	گوجه فرنگی گیلاسی
Mizuno et al., 2011:179	افزایش محتوای کلروفیل و طول ساقه و برگ	فقط LEDهای آبی (۴۷۰ نانومتر)، ۵۰ میکرومول	کلم
Li et al., 2012:262	افزایش غلظت ویتامین C و کلروفیل	LED آبی (۴۶۰ نانومتر، ۱۱ درصد از کل تابش) با رنگ قرمز (۶۶۰ نانومتر) کل PPF در ۸۰ میکرومول	کلم چینی
Li & Kubota, 2009: 59	افزایش ۳۱ درصدی آنتوسیانین و ۱۲ درصدی کاروتنوئیدها	LEDهای آبی (۴۷۶ نانومتر، ۱۳۰ میکرومول)	کاهو
Nanya et al., 2012: 261	نسبت بالاتر آبی/قرمز (۰:۱) باعث کاهش طول ساقه شده است	قرمز (۶۶۰ نانومتر) و آبی (۴۵۰ نانومتر) در نسبت‌های مختلف	گوجه فرنگی
Ménard et al., 2006: 291	کاربرد LED آبی به‌همراه لامپ HPS کل زیست توده را افزایش داده اما عملکرد محصول را کاهش می‌دهد	آبی (۴۵۵ نانومتر)	خیار
Johkan et al., 2012: 128	LEDهای سبز با PPF بالا (۳۰۰ میکرومول) بیشترین اثر را در بالا بردن رشد کاهو داشتند	LEDهای سبز ۵۳۰، ۵۲۰ و ۵۱۰ نانومتر استفاده شده و کل PPF به ترتیب ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومول بود	کاهو قرمز
Samuolienė et al., 2012: 885	۵۳۰ نانومتر اثر مثبت بر توسعه تجمع رنگدانه‌های فتوسنتزی در خیار را نشان داد در حالی که ۵۰۵ نانومتر باعث افزایش سطح برگ، زیست توده‌ی تر و خشک در گوجه فرنگی و فلفل دلمه‌ای شد	LEDهای سبز (۵۰۵ و ۵۳۰ نانومتر، ۱۵ میکرومول) با لامپ HPS (۹۰ میکرومول)	گوجه فرنگی، فلفل دلمه‌ای، خیار
NovičKovas et al., 2012: 723	۵۰۵ و ۵۳۰ نانومتر، هر دو منجر به افزایش سطح برگ، وزن تر و خشک شد	LEDهای سبز (۵۰۵ و ۵۳۰ نانومتر، ۱۵ میکرومول) با لامپ HPS (۹۰ میکرومول)	خیار

## ۵. پتانسیل LEDها در پرورش گل

گیاهان زینتی در دنیا از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار می‌باشند. گل‌های شاخه بریده و گلدانی بازار وسیعی در سراسر جهان دارند. LEDها نیز با ارائه یک طیف نوری مناسب (کیفیت و مدت زمان نور) می‌توانند نقش کلیدی را در پرورش گل و گیاهان زیستی داشته باشند. نور سیکل زندگی گیاهان را کنترل می‌کند. بدین معنی که تشخیص سیکل شب و روز را برای گیاهان فراهم می‌کند و این سیکل زندگی اندام‌زایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین نسبت نور قرمز و قرمز دور نقش مهمی در تنظیم گلدهی دارند (Simpson & Dean, 2002: 285 & Yanovsky & Kay, 2002: 308). گلدهی در گیاهان به‌طور عمده توسط فیتوکروم‌ها (گروهی از رنگدانه‌های گیاهی) کنترل می‌شود که در دو شکل صورت می‌گیرد.

Pr (پاسخ به نور قرمز) و Pfr (پاسخ به نور قرمز دور): این دو رنگدانه به یکدیگر تبدیل می‌شوند. Pr تحت نور قرمز به Pfr تبدیل شده و Pfr با نور قرمز دور به Pr تبدیل می‌شود. فرم فعالی که باعث گلدهی می‌شود Pfr است. Pr به‌طور طبیعی در گیاهان تولید می‌شود. نسبت PR به Pfr وقتی که گیاهان نور (روز) را دریافت می‌کنند در تعادل و موازنه است، زیرا Pr به وسیله نور قرمز به Pfr تبدیل شده و Pfr نیز به وسیله نور قرمز دور به Pr تبدیل می‌شود (شکل ۳). تبدیل Pfr به Pr در واکنش تاریکی نیز امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین تاریکی (شب) که به‌طور اصلی روی نسبت Pr به Pfr تأثیر می‌گذارد، تعیین‌کننده زمان گلدهی در گیاهان است (Downs & Thomas, 1982: 898 & Smith, 1982: 481).



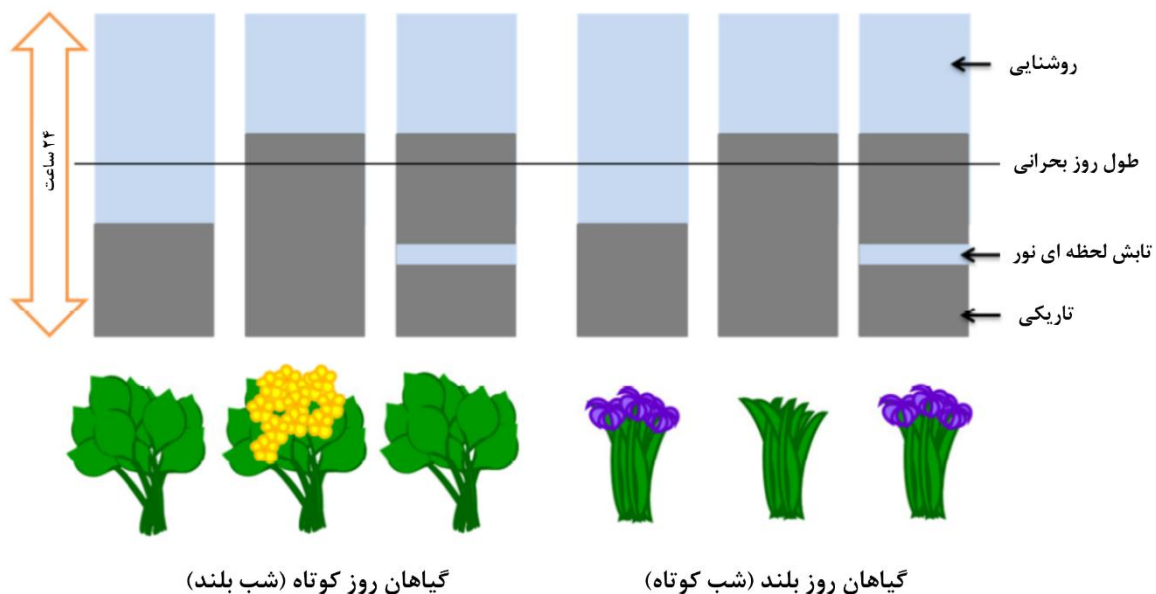
شکل ۳. تبدیل فیتوکرومها به یکدیگر توسط نور قرمز و قرمز دور

اگر طول شب از حد معینی کوتاهتر باشد گل نخواهند داد (مانند داودی).

ب. گیاهان روز بلند (Long day plants-LDP): گیاهان روز بلند برای گلدهی به روز بلند و شب کوتاه احتیاج دارند. بنابراین آنها را می‌توان شب کوتاه نامید. طول شب برای آنها نباید از حد معینی بلندتر باشد (مانند کاهو و سیب زمینی).

گیاهان براساس طول روز یا دوره نوری مورد نیاز برای گلدهی به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند (Zukauskas et al., 2011: 87; Downs & Thomas, 1982: 898 & Evans, 1976: 207):

الف. گیاهان روز کوتاه (Short day plants-SDP): گیاهان روز کوتاه برای گلدهی به روز کوتاه، و درواقع به شب بلند نیاز دارند. بنابراین می‌توان آنها را «شب بلند» نامید. چنین گیاهانی



شکل ۴. گیاهان روز کوتاه و روز بلند و تاثیر طول دوره تاریکی و روشنایی در گلدهی آنها

برای چنین گیاهان روز بلند افزایش نور مادون قرمز (۷۰۰ تا ۸۰۰) به نور قرمز (۶۰۰ تا ۷۰۰) به‌منظور گسترش طول روز باعث شروع گلدهی و رشد می‌شود (Runkle & Heins, 2001: 275). Meng و Runkle (۲۰۱۴) لامپ‌های ۱۵۰ وات رشته‌ای و ۱۴ وات قرمز، سفید و قرمز دور LED (تولید شده به‌وسیله فیلیپس) را برای مطالعه گلدهی در گیاهان مختلف استفاده نمودند و دریافتند که گلدهی و جوانه‌زنی گیاهان زیر لامپ‌های ۱۴ وات LED فیلیپس (قرمز، سفید، قرمز دور) بسیار

واضح است که گیاهان روز بلند نیاز به نور بیشتر (عموماً بیش از ۱۴ ساعت روشنایی) برای گلدهی دارند و قاعدتاً منبع نور طیف وسیع (لامپ‌های رشته‌ای و سدیم با فشار بالا) شدت بالاتر از نیاز برای گلدهی را ارائه می‌نمایند و نتیجه آن مصرف مقدار زیادی انرژی الکتریکی می‌باشد. روشنایی LED یک گزینه کارآمد انرژی برای تنظیم گلدهی در گیاهان زینتی روز بلند است، زیرا LEDها انرژی کمتری مصرف نموده و طول موج‌های خاصی از نور را که مورد نیاز می‌باشد ارائه می‌نمایند.



ترتیب دادند که در آن گوجه فرنگی تولید شده در طول سال در زیر نور لامپ‌های سنتی HPS و لامپ‌های LEDهای قرمز و آبی مقایسه شده است (Kacira, 2011: 19). نتایج نشان داد که عملکرد گوجه فرنگی در زیر نور لامپ‌های LED برابر است با عملکرد این محصول در زیر نور لامپ‌های سنتی HPS. در حالی که لامپ‌های LED فقط ۲۵ درصد لامپ‌های سنتی مصرف دارند (Mitchell et al., 2012: 6).

لامپ‌های سنتی HPS تنها ۳۰ درصد از انرژی دریافتی را به نور قابل استفاده تبدیل می‌کنند و بقیه به صورت گرما از بین می‌رود. در حالی که LEDها می‌توانند بیش از ۵۰ درصد آن را تبدیل نموده و آن را برای طول موج‌های خاصی بهینه کنند. این موضوع صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و در نتیجه در هزینه را نشان داده که می‌تواند تولید با هزینه کم را در فضای رقابتی صنعت گلخانه به وجود آورد. علاوه بر این اثرات کمیت و کیفیت نور بر رشد گیاه نیز می‌تواند نقش مهمی را در بهبود بهره‌وری کلی ایفا نماید (Nelson & Bugbee, 2013).

#### ۷. هزینه‌های عملیاتی LED و HPS

همان‌طور که اخیراً توسط Meng و Runkle گزارش شده است، یک لامپ HPS ۱۵۰ وات و یک لامپ LED ۱۴ وات اثر مشابهی روی الگوی گلدهی گیاهان دارد. بنابراین به کار بردن یک LED ۱۴ وات برای گیاهان گلخانه‌ای بسیار اقتصادی خواهد بود (Meng & Runkle, 2014).

محاسبه‌ی هزینه‌های عملیاتی LED و HPS برای تولیدکنندگان گلخانه‌ای در زیر آورده شده است:

- میانگین زمان روشنایی (در زمستان) در گلخانه: ۱۶ ساعت در روز؛
- برق مصرف شده توسط لامپ HPS ۱۵۰ وات: ۲/۴ کیلووات ساعت در روز؛
- برق مصرف شده توسط لامپ LED ۱۴ وات: ۰/۲۲ کیلووات ساعت در روز؛
- مصرف برق سالانه (HPS): ۸۷۶ کیلووات ساعت؛
- مصرف برق سالانه (LED): ۸۰/۳ کیلووات ساعت؛
- هزینه برق سالانه: ۹۶۳۶۰ ریال برای لامپ HPS ۱۵۰ وات؛
- هزینه برق سالانه: ۸۸۳۳ ریال برای لامپ LED ۱۴ وات.

مشابه گیاهانی است که زیر لامپ‌های رشته‌ای ۱۵۰ وات قرار دارند (Meng & Runkle, 2014). LEDها (قرمز، سفید و قرمز دور) به اندازه لامپ‌های سنتی توانسته‌اند مؤثر واقع شوند، اما LEDها کارایی بالاتری دارند زیرا آنها تنها ۱۴ وات انرژی الکتریکی را در هر لامپ مصرف می‌کنند. کارایی انرژی بالاتر و طول عمر بیشتر مهم‌ترین مزایای LEDها در کشت و کار گلخانه‌ای گیاهان زیستی است.

#### ۶. تجزیه و تحلیل اقتصادی لامپ‌های LED در گلخانه

صنایع گلخانه به‌طور مداوم برای ارائه محصولات (سبزی و زینتی) که مورد نظر مشتری باشد با چالش قیمت مناسب بازار روبه‌رو هستند. به‌منظور کنترل هزینه‌های تولید، گلخانه‌دارها باید به فکر پایداری منابع و امکانات مورد نیاز در کشت گلخانه‌ای باشند. گرم کردن (حفظ دمای مطلوب) و روشنایی (فتوپریود) مهم‌ترین عوامل هزینه‌ای در میان سایر نیازمندی‌ها (مانند محیط کشت/ بذرها و قلمه‌ها/ کود و مواد شیمیایی) هستند. یک ابزار کارآمد انرژی می‌تواند هزینه‌ی تولید سبزیجات و گل‌های زینتی را کاهش دهد. امروزه بازار گلخانه‌ای به‌منظور تأمین تقاضای سبزیجات (به‌ویژه خارج از فصل) و گل‌های زینتی به سرعت در حال رشد است. در مقیاس جهانی، چین بیشترین تولید محصولات گلخانه‌ای را دارا است در حالی که در اروپا، اسپانیا بزرگترین تولیدکننده سبزیجات گلخانه‌ای می‌باشد (Shinomura et al., 2000: 147; Gomez et al., 2013: 93). نتایج یک تحقیق باغبانی منتشر شده توسط وزارت اقتصاد، کشاورزی و نوآوری هلند نشان می‌دهد که گوجه فرنگی، خیار و کاهو بیشترین تولیدات کشاورزی به وسیله صنعت گلخانه در اروپا هستند (Voss, 2011). تحقیقات اقتصادی گزارش کرده‌اند که ۲۵ تا ۳۵ درصد از هزینه‌های تولید کشت گوجه‌فرنگی، برای کنترل گرما و تأمین نور مصرف شده است و صنایع گلخانه‌ای به‌دنبال یک روش جدید کارآمد انرژی برای کاهش هزینه‌های تولید هستند (Idem). LEDها می‌توانند با بهره‌وری بالای انرژی و طول عمر زیاد راه‌حل مناسبی برای روشنایی گلخانه‌ها در نظر گرفته شوند.

مطالعات متعددی روی نقش LEDها در تولیدات گلخانه‌های تجاری ارائه شده است. دانشمندان در دانشگاه پوردو آزمایشی را

## ۸. نتیجه گیری

فناوری LED توانایی انعطاف پذیری زیادی را در دوره های تولید به منظور انطباق شرایط نوری با نیازهای خاص گیاهان دارا می باشد. استفاده از لامپ های LED افق جدیدی را در بهره وری انرژی در گلخانه ها و در نتیجه هزینه های تولید سبزیجات و گل های زینتی ارائه نموده است.

تحلیل های اقتصادی به وضوح نشان می دهند که LEDها می توانند هزینه های برق مصرفی در گلخانه ها را کاهش داده و سرمایه گذاری انجام شده برای این سیستم های نوری در طول دوره ی عملیات، به عنوان سود به صنایع گلخانه برخواهد گشت. لامپ های LED دارای طول عمر بسیار بالا و مصرف انرژی بسیار پایین هستند. به عنوان مثال هر لامپ LED ۱۴ وات نوری معادل یک لامپ متال هالید ۱۵۰ وات برای فرایند فتوسنتز مفید است. در واقع می توان لامپ LED را به دلیل شار نوری بالا و گرمای تابشی کمی که تولید می کند، در فاصله ای نزدیک به گیاه نصب کرد که در نتیجه میزان تمرکز نور روی گیاه بسیار بالا می رود و از هدررفت انرژی جلوگیری به عمل می آید. این تمرکز نوری موجب رشد بهتر و بیشتر گیاه می شود. اما در لامپ های متال هالید به دلیل تولید حرارت بالا می بایست در فاصله مناسبی نسبت به گیاه نصب شود. علاوه بر این، بهینه سازی کیفیت طیفی نور تولیدی توسط LEDها علاوه بر بهبود رشد گیاهان (بهره وری فتوسنتزی، ارزش غذایی و تنظیم گلدهی)، کارایی انرژی الکتریکی را به طور قابل توجهی افزایش داده و مصرف برق را کاهش می دهد. به عنوان مثال آزمایشات اخیر روی گوجه فرنگی نشان داده است که تولیدکنندگان می توانند با استفاده از لامپ های LED با کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصد در هزینه ی تولید، عملکرد مشابهی در مقایسه با لامپ های سنتی و مرسوم در گلخانه ها داشته باشند.

به هر حال، برای استفاده از پتانسیل لامپ LED به عنوان یک منبع نوری در صنایع گلخانه، نیاز به تحقیقات بیشتری برای شناخت هر چه بیشتر فرایندهای فیزیولوژیکی و پاسخ گیاهان به نور تولیدی توسط لامپ های LED است. طیف های مختلف نوری اثرات متفاوتی بر رشد گیاهان دارند. بیشترین مطالعات روی اثرات تابش LED بر روی فیزیولوژی گیاهان شامل لامپ های LED قرمز، قرمز دور و آبی به عنوان منبع اصلی نور است. لامپ سبز در فتوسنتز به عنوان نور ناکارآمد در نظر گرفته می شود، در حالی که حتی فتوسنتز ناکارآمد حاصل از این لامپ ها می تواند در توسعه و تنظیم رشد با لامپ قرمز و آبی مشارکت داشته باشد. با این وجود، تحقیقات بیشتری برای درک نقش لامپ های سبز در توسعه تنظیمات گیاهی، گلدهی، جوانه زنی، باز شدن روزنه ها و تنظیم طول گیاهان لازم است.

12. Folta, K.M. (2004), "Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition", *Plant physiol.*, 135: 1407–1416.

13. Goins, G.D.; Ruffe, L.M.; Cranston, N.A.; Yorio, N.C.; Wheeler, R.M. & Sager, J.C. (2001), "Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs)", SAE technical paper, 31st international conference on environmental systems", July 9–12, 2001, Orlando, Florida, USA, 1–9.

14. Goins, G.D.; Yorio, N.C.; Sanwo, M.M. & Brown, C.S. (1997), "Photo morphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting", *J. Exp. Bot.*, 48: 1407–1413.

15. Gomez, C.; Morrow, R.C.; Bourget, C.M.; Massa, G.D. & Mitchell, C.A. (2013), "Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes", *Hort technology*, 23: 93–98.

16. Ieperen, V.W. & Trouwborst, G. (2008), "The application of LEDs as assimilation light source in greenhouse horticulture: a simulation study", *Acta Hort*, 33: 1407-1414.

17. Johkan, M.; Shoji, K.; Goto, F.; Hahida, S. & Yoshihara, T. (2012), "Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*", *Environ exp. Bot.*, 75: 128–133.

18. Kacira, M. (2011), "Greenhouse production in US: status, challenges, and opportunities", presented at CIGR 2011 conference on sustainable bioproduction WEF 2011, September 19-23.

19. Keefe, T.J. (2012), "The nature of light", archived from the original on 2012-07-24, Retrieved 2007-11-05 Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.

20. Kim, H.H.; Goins, G.D.; Wheeler, R.M. & Sager, J.C. (2004), "Green- light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue light-emitting diodes", *Hort science*, 39: 1617–1622.

21. Langton, A.; Plackett, C. & Kitchener, H. (2006), "Energy saving in poinsettia production",

## منابع

1. Akoyunoglou, G. & Anni, H. (1984), "Blue light effect on chloroplast development in higher plants", in: Senger, H. (ed.), blue light effects in biological systems, Springer-Verlag, Berlin, 397–406.

2. Barreiro, R.; Guiamet, J.J.; Beltrano, J. & Montaldi, E.R. (1992), "Regulation of the photosynthetic capacity of primary bean leaves by the red: far-red ratio and photosynthetic photon flux density of incident light", *Physiol. Plant*, 85: 97–101.

3. Barta, D.J.; Tibbits, T.W.; Bula, R.J. & Morrow, R.C. (1992), "Evaluation of light emitting diode characteristics for space-based plant irradiation source", *Adv. Space Res.*, 12: 141-9.

4. Bliznikas, Z.; Žukauskas, A.; Samuolienė, G.; Viršilė, A.; Brazaitytė, A.; Jankauskienė, J.; Duchovskis, P. & Novičkovas, A. (2012), "Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables", *Acta hort*, 939: 85–91.

5. Bourget, C.M. (2008), "An introduction to light-emitting diodes", *Hort science*, 43: 1944- 1946.

6. Brown, C.; Shuerger, A.C. & Sager, J.C. (1995), "Growth and photo morphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting", *J. Am Soc. Hortic. Sci.*, 120: 808–813.

7. Brumfield, R. (2007), "Dealing with rising energy costs", *GPN*, 17: 24-31.

8. Bula, R.J.; Morrow, R.C.; Tibbits, T.W.; Barta, R.W.; Ignatius, R.W & Martin, T.S. (1991), "Light emitting diodes as a radiation source for plants", *Hort science*, 26: 203–205.

9. Chen, P. (2014), "Chlorophyll and other photosensitives", In: LED grow lights, absorption spectrum for plant photosensitive pigments, <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>, accessed 12 March 2014.

10. Downs, R.J. & Thomas, J.F. (1982), "Phytochrome regulation of flowering in the long-day plant", *Hyoscyamusniger*, *plant physiol.*, 70: 898–900.

11. Evans, L.T. (1976), "Inflorescence initiation in *Loliumtemu lentum* L. XIV. The role of phytochrome in long day induction". *Austral. J. Plant physiol.*, 3: 207–217.

- cabbage seedlings”, Acta horticulturae, 907: 179–184.
32. Morrow, R.C. (2008), “LED lighting in horticulture”, Hort science, 43: 1947–1950.
33. Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S. & Goto, E. (2012), “Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings”, Acta Hort., 956: 261–266.
34. Nelson, A.J. & Bugbee, B. (2013), “Supplemental greenhouse lighting: return on investments for LED and HPS fixtures”, [http://cpl.usu.edu/files/publications/factsheet/pub\\_4338884.pdf](http://cpl.usu.edu/files/publications/factsheet/pub_4338884.pdf)
35. Nishio, J.L. (2000), “Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement”, Plant cell environ, 23: 539–548.
36. Novičkovas, A.; Brazaitytė, A.; Duchovskis, P.; Jankauskienė, J.; Samuolienė, G.; Viršilė, A.; Sirtautas, R.; Bliznikas, Z. & Žukauskas, A. (2012), “Solid-state lamps (LEDs) for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses: experimental results with cucumber”, Acta hort., 927: 723–730.
37. Olle, M. & Virsile, A. (2013), “The effect of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality”, Agric food Sci., 22: 223-234.
38. Opdam, J.G.; Schoonderbeek, G.G.; Heller, E.B. & Gelder, A. (2005), “Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture”, Acta Hort, 691: 517-524.
39. Runkle, E.S. & Heins, D.R. (2001), “Specific functions of red, far-red and blue lights in flowering and stem extension of long-day plants”, J. Amer. Soc., Hort sci., 126: 275–282.
40. Saebo, A.; Krekling, T. & Appelgren, M. (1995), “Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of brich plantlets in vitro”, Plant cell tiss org, 41: 177–185.
41. Samuolienė, G.; Urbonavičiūtė, A.; Duchovskis, P.; Bliznikas, Z.; Vitta, P. & Žukauskas, A. (2009), “Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator”, Hort science, 44: 1857–1860.
42. Samuolienė, G.; Sirtautas, R.; Brazaitytė, A.; Viršilė, A. & Duchovskis, P. (2012), “Supplementary red- LED lighting and the changes in Horticultural development council fact sheet, 7: 1-12.
22. Lefsrud, M.G.; Kopsell, D.A. & Sams, C.E. (2008), “Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affects secondary metabolites in kale”, Hort science, 43: 2243–2244.
23. Li, H.; Tang, C.; Xu, Z.; Liu, X. & Han, X. (2012), “Effects of different light sources on the growth of nonheading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.)”, J. Agr. Sci., 4: 262–273.
24. Li, Q. & Kubota, C. (2009), “Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce”, Environ Exp. Bot., 67: 59–64.
25. Lin, K.H.; Huang, M.Y.; Huang, W.D.; Hsu, M.H.; Yang, Z.W. & Yang, C.M. (2013), “The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata)”, SciHortic-Amsterdam, 150: 86–91.
26. Lu, N.; Maruo, T.; Johkan, M.; Hohjo, M.; Tsukakoshi, S.; Ito, Y.; Ichimura, T. & Shinohara, Y. (2012), “Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density”, Environ control Biol., 50: 63–74.
27. Massa, G.D.; Kim, H.H.; Wheeler, R.M. & Mitchell, C.A. (2008), “Plant productivity in response to LED lighting”, Hort science, 43: 1951–1956.
28. Ménard, C.; Dorais, M.; Hovi, T. & Gosselin, A. (2006), “Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light”, Acta Hort, 711: 291–296.
29. Meng, Q. & Runkle, E.S. (2014), “Control flowering with LEDs”, Lighting research, Growers talk 62, <http://www.ballpublishing.com/GrowerTalks/ViewArticle.aspx?articleid=20604>, Accessed 15 Feb.
30. Mitchell, C.A., Both, A., Bourget, C.M., Kuboto, C., Lopez, R.G., Morrow, R.C. & Runkle, S. (2012), “LEDs: the future of greenhouse lighting”, Chronica horticulture; 55: 6-12.
31. Mizuno, T.; Amaki, W. & Watanabe, H. (2011), “Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in laves of

- emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production”, *Acta horticulturae*, 956: 171–178.
53. Tennessen, D.J.; Singsaas, E.L. & Sharkey, T.D. (1994), “**Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research**”, *Photosynth Res.*, 39: 85–92.
54. Tripathy, B.C. & Brown, C.S. (1995), “**Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light**”, *Plant physiol*, 107: 407–411.
55. Vänninen, I.; Pinto, D.M.; Nissinen, A.I.; Johansen, N.S. & Shipp, L. (2010), “**In the light of new greenhouse technologies: plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions**”, *Ann Appl. Biol.*, 157: 393–414.
56. Voss, J. (2011), “**Market special: greenhouse farming in Germany**”, the ministry of economics affairs, agriculture and innovation, NL, EVD international.
57. Yanagi, T. & Okamoto, K. (1997), “**Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth**”, *Acta Hort*, 418: 223–228.
58. Yanovsky, M.J. & Kay, S.A. (2002), “**Molecular basis of seasonal time measurement in *Arabidopsis***”, *Nature*, 419: 308–312.
59. Yeh, N. & Chung, J.P. (2009), “**High-brightness LEDs – energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation**”, *Renew Sust Energy Rev*, 13: 2175–2180.
60. Yorio, N.C.; Goins, G.D.; Kagie, H.R., Wheeler, R.M. & Sager, J.C. (2001), “**Improving spinach, radish and lettuce growth under red light emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation**”, *Hort science*, 36: 380–383.
61. Žukauskas, A.; Bliznikas, Z.; Breivė, K.; Novičkovas, A.; Samuolienė, G.; Urbonavičiūtė, A.; Brazaitytė, A.; Jankauskienė, J. & Duchovskis, P. (2011), “**Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant properties of lettuce cultivars**”, *Acta Hort*, 907: 87–90.
- phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons”, *J. food agric. Environ*, 10: 701 – 706.
43. Samuolienė, G.; Brazaitytė, A.; Sirtautas, R.; Novičkovas, A. & Duchovskis, P. (2011), “**Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce**”, *J. food agric. Environ*, 9: 271–274.
44. Samuolienė, G.; Brazaitytė, A.; Duchovskis, P.; Viršilė, A.; Jankauskienė, J.; Sirtautas, R.; Novičkovas, A.; Sakalauskienė, S. & Sakalauskaitė, J. (2012), “**Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses**”, *Acta hort.*, 952: 885–892.
45. Senger, H. (1982), “**The effect of blue light on plants and microorganisms**”, *phytochem photobiol*, 35: 911–920.
46. Shinomura, T.; Uchida, K. & Furuya, M. (2000), “**Elementary processes of photo perception by phytochrome A for high-irradiance response of hypocotyl elongation in *Arabidopsis***”, *Plant physiol*, 122: 147–156.
47. Simpson, G.G. & Dean, C. (2002), “***Arabidopsis*, the Rosetta stone of flowering time?**” *Science*, 296: 285–289.
48. Sims, D.A. & Pearcy, R.W. (1992), “**Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in *Alocasiamacrorrhiza* (Araceae) to a transfer from low to high light**”, *Am. J. Bot.*, 79: 449–455.
49. Smith, H. (1982), “**Light quality, photo perception, and plant strategy**”, *Annu Rev. plant physiol*, 33: 481–518.
50. Stutte, G.W.; Edney, S. & Skerritt, T. (2009), “**Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes**”, *Hort science*, 44: 79–82.
51. Tanaka, Y.; Kimata, K. & Aiba, H. (2000), “**A novel regulatory role of glucose transporter of *Escherichia coli*: membrane sequestration of a global repressor Mic**”, *EMBO J.* 19: 5344–5352.
52. Tarakanov, I.; Yakovleva, O.; Konovalova, I.; Paliutina, G. & Anisimov, A. (2012), “**Light-**