

۱۸۱۱۵۲

لامپ های LED برای کشاورزی

نورپردازی هوشمند

ویراستار:

اس. دوتا گوپتا

مترجمان:

دکتر علیرضا بابایی

دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

یوسف فرخ زاد

دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس

سعید شیراوند

دانش آموخته ی رشته فیزیک پژوهشگاه مواد و انرژی

فهرست

۹	پیشگفتار
۱۲	در مورد ویراستار کتاب
۱۳	پیشگفتار ویراستار
۱۷	پیشگفتار مترجمان
۱۹	فصل ۱: سیستم نور مصنوعی برای رشد و نمو گیاه، توسعه در طول زمان، اصول کار و ارزیابی مقایسه‌ای
۱۹	۱-۱ مقدمه
۲۳	۱-۲ تاریخچه توسعه و اصول کار لامپ‌های رایج
۲۳	۱-۲-۱ لامپ‌های رشته‌ای (ILS)
۲۶	۱-۲-۲ لامپ‌های تخلیه‌ای گازی (GDLs)
۲۷	۱-۲-۲-۱ لامپ‌های فلورسنت (FLs)
۳۰	۱-۲-۲-۲ لامپ‌های تخلیه‌ای سد فلاید (HDLs)
۳۵	۱-۳ دیودهای منتشر کننده نور (LEDs)
۳۵	۱-۳-۱ توسعه فناوری LED
۳۸	۱-۳-۲ ساختار و نحوه کار LED
۴۱	۱-۴ ارزیابی مقایسه‌ای سیستم‌های روشنایی مصنوعی مختلف
۴۲	۱-۴-۱ کیفیت طیف
۴۶	۱-۴-۲ کارآمدی درخشانی و نیاز به نیرو
۴۸	۱-۴-۳ تولید گرمای لامپ
۴۹	۱-۴-۴ طول عمر، کدر شدن، قابلیت جهت‌گیری، پایداری و ایمنی
۵۰	۱-۵ نتیجه‌گیری
۵۲	منابع
۵۵	فصل ۲: نور تکمیلی LED
۵۵	۲-۱ مقدمه
۵۶	۲-۲ مزایای تکنولوژی LED به عنوان سیستم نورپردازی تکمیلی
۵۷	۲-۳ نور تکمیلی برای فتوسنتز
۵۹	۲-۴ نور تکمیلی برای کنترل ریختزایی

- ۶۰ ۲-۵ نور تکمیلی برای اهداف دیگر
- ۶۰ ۲-۵-۱ محافظت در مقابل بیماری‌های گیاهی
- ۶۱ ۲-۵-۲ بهبود غلظت ترکیبات دارای کارکرد
- ۶۱ ۲-۶ ارزیابی کارایی نورپردازی تکمیلی
- ۶۱ ۲-۶-۱ روش‌های ارزیابی کارآمدی نورپردازی تکمیلی
- ۶۴ ۲-۶-۲ اقداماتی برای افزایش کارآمدی نور تکمیلی
- ۶۵ ۲-۷ نتیجه‌گیری
- ۶۶ منابع

- ۶۹ فصل ۳: اثر دودهای منتشر کننده‌ی نور (LED) بر درک نور و شبکه‌های انتقال سیگنال در گیاهان
- ۶۹ ۳-۱ مقدمه
- ۷۵ ۳-۲ ویژگی سیستم‌های LED که می‌توانند شبکه‌های گیاهی را فعال کند
- ۷۷ ۳-۳ تقلید نور خورشید
- ۷۹ ۳-۴ تلفیق زیست‌شناسی گیاهی و سیستم‌های نوری مهندسی شده
- ۸۳ ۳-۵ شبکه‌های درک و انتقال سیگنال: آنها چه کاری انجام می‌دهند و چگونه کار می‌کنند؟
- ۸۳ ۳-۵-۱ شبکه‌های درک و انتقال سیگنال فتوسنتزی: کنترل فتوسنتزی
- ۸۸ ۳-۵-۲ حسگرهای گیرنده‌ی نور (فتورسپورها) و شبکه‌های انتقال سیگنال
- ۹۱ ۳-۶ نتیجه‌گیری
- ۹۳ منابع

- ۱۰۱ فصل ۴: بهینه کردن نور LED برای کشاورزی در محیط سرپشته
- ۱۰۱ ۴-۱ مقدمه
- ۱۰۳ ۴-۲ مزایای فناوری LED برای رشد گیاه
- ۱۰۴ ۴-۲-۱ فقدان گرمای تابشی
- ۱۰۵ ۴-۲-۲ کنترل طیف نور
- ۱۰۶ ۴-۲-۳ قابلیت کنترل لامپ‌های LED
- ۱۰۷ ۴-۳ بهینه‌سازی کنترل نورپردازی
- ۱۰۸ ۴-۳-۱ چه مقدار نور بهینه است؟
- ۱۱۲ ۴-۳-۲ فلورسانس کلروفیل به عنوان ابزاری برای پایش عملکرد محصول
- ۱۱۵ ۴-۳-۳ بازنگری در طیف بهینه برای فتوسنتز
- ۱۱۸ ۴-۳-۴ اهمیت نور قرمز دور
- ۱۲۰ ۴-۳-۵ آیا نور سبز سبب افزایش فتوسنتز می‌شود؟
- ۱۲۱ ۴-۳-۶ کنترل انطباقی لامپ‌های LED

۱۲۳	۴-۳-۷ کنترل بازخورد زیستی لامپ‌های LED
۱۲۶	۴-۴ نتایج
۱۲۷	منابع
۱۳۱	فصل ۵: مباحث اقتصادی پیرامون نورپردازی با LED
۱۳۱	۵-۱ مقدمه
۱۳۲	۵-۲ اقتصاد روشنایی LED: آتالیزهای اولیه تا سال ۲۰۱۴
۱۳۳	۵-۳ بهترین معیار کارآمدی الکتریکی برای رشد گیاه، میکرومول در ژول است
۱۳۴	۵-۴ مقدار فوتون‌های متمرکز لامپ‌های LED
۱۳۵	۵-۵ ویژگی‌های منحصر به فرد لامپ‌های LED
۱۳۶	۵-۶ پیشرفت‌ها در اثربخشی لامپ‌های LED از سال ۲۰۱۴ به بعد
۱۳۸	۵-۷ تعریف اثربخشی و کارآمدی
۱۳۹	۵-۸ اثر حرارتی تکنولوژی‌های مختلف روشنایی الکتریکی
۱۴۱	۵-۸-۱ تأثیر افزایش گرین دی اکسید بر دمای برگ
۱۴۱	۵-۸-۲ اثر تکنولوژی نور بر دمای نوک شاخساره
۱۴۱	۵-۸-۳ تأثیر تکنولوژی نور بر دمای میوه و گل
۱۴۳	۵-۹ اثرات طبقی بر فتوسنتز یک تک‌برگ
۱۴۴	۵-۱۰ تعیین فتوسنتز خالص گیاه کامل از سرعت رشد محصول و شاخص سطح برگ
۱۴۶	۵-۱۱ اهمیت کارآمدی به دام افتادن تابش
۱۴۶	۵-۱۲ تأثیر طیف بر کارآمدی فتوسنتزی تک برگ‌ها
۱۴۷	۵-۱۳ تأثیر کسر نور آبی بر رشد
۱۴۷	۵-۱۴ تأثیر کسر نور آبی بر نمو
۱۴۸	۵-۱۵ تأثیر کسر نور سبز بر فتوسنتز و رشد
۱۵۲	۵-۱۶ نتیجه‌گیری
۱۵۳	منابع
۱۵۷	فصل ۶: مطالعه‌ی مروری سیستم روشنایی LED و کیفیت طیف روی فتوسنتز گیاه
۱۵۷	۶-۱ مقدمه
۱۵۹	۶-۲ دیودهای منتشر کننده‌ی نور (LED)
۱۶۰	۶-۳ واکنش فتوسنتز
۱۶۳	۶-۴ رنگی‌دهای فتوسنتزی
۱۶۵	۶-۵ اثر LED بر فلورسانس کلروفیل
۱۶۶	۶-۶ دیودهای منتشر کننده‌ی نور (LED) برای فتوسنتز و رشد گیاه

۶-۷ نتیجه‌گیری

منابع

فصل ۷: کاربرد نور LED در باغبانی

۷-۱ مقدمه

۷-۲ مفهوم روشنایی LED در باغبانی و ظهور آن

۷-۲-۱ مفهوم کارآمدی طیف نور

۷-۲-۲ LED در گلخانه و باغبانی در محیط‌های سرپسته

۷-۳ تکنولوژی LED در مقایسه با لامپ سدیمی برفشار

۷-۴ نورپردازی LED برای محصولات مهم باغی

۷-۴-۱ میکروگرین‌ها

۷-۴-۲ کاهو و دیگر سبزیجات برگ‌ری

۷-۴-۳ تولید نشاء سبزیجات

۷-۴-۴ تولید سبزیجات گلخانه‌ای

۷-۴-۵ گیاهان زینتی

۷-۵ نتیجه‌گیری

منابع

فصل ۸: دودهای منتشر کننده‌ی نور (LED) برای بهبود ارزش تغذیه‌ای

۸-۱ مقدمه

۸-۲ ترکیبات فتولی

۸-۳ کاروتنوئیدها

۸-۴ توکوفرول‌ها

۸-۵ آسکوربیک اسید

۸-۶ نتیجه‌گیری

منابع

فصل ۹: دودهای منتشر کننده‌ی نور برای حفظ کیفیت پس از برداشت و ایمنی میکروبیولوژیک غذا

۹-۱ مقدمه

۹-۲ جمع‌بندی مختصر تکنولوژی LED و سنجده‌های نور

۹-۳ تکنولوژی LED جهت حفظ کیفیت میوه‌ها و سبزیجات طی مراحل پس از برداشت

۹-۳-۱ به تعویق انداختن پیری سبزیجات از طریق LED

۹-۳-۲ بهبود وضعیت تغذیه‌ای سبزیجات و میوه‌ها از طریق LED

۲۴۷	۹-۳-۳ سرعت دادن یا به تعویق انداختن رسیدن میوه‌ها با استفاده از LED
۲۴۸	۹-۳-۴ جلوگیری از فساد قارچی از طریق تکنولوژی LED
۲۵۰	۹-۳-۵ ارزیابی تکنولوژی LED جهت حفاظت محصول در مرحله‌ی پس از برداشت
۲۵۲	۹-۴ نقش LED در ایمنی مواد غذایی
۲۵۳	۹-۴-۱ غیر فعالسازی فتودینامیک (PDI) با استفاده از حساس کننده‌های نوری برون‌زا
۲۵۶	۹-۴-۲ غیر فعالسازی فتودینامیک (PDI) از طریق حساس کننده‌های درون‌زا
۲۶۲	۹-۴-۳ LEDهای فرابنفش
۲۶۴	۹-۴-۴ اکسیداسیون فتوکاتالیتی با استفاده از LED
۲۶۶	۹-۴-۵ اثر غیر فعالسازی فتودینامیک در کنار LEDها بر فرآورده‌های غذایی
۲۶۹	۹-۴-۶ غیر فعالسازی فتودینامیک برای آلودگی‌زدایی سطح مواد غذایی از طریق مواد بسته‌بندی و با استفاده از LED
۲۷۰	۹-۴-۷ ارزیابی نقش LED در ایمنی میکروبیولوژیک غذاها
۲۷۳	۹-۵ نتایج
۲۷۶	منابع

۲۸۵	فصل ۱۰: تنظیم بیان ژن تحت نور LED
۲۸۵	۱۰-۱ مقدمه
۲۸۷	۱۰-۲ تنظیم بیان ژن بواسطه‌ی LED
۲۸۷	۱۰-۲-۱ تنظیم بیان ژن غیرنورده‌های نوری و عوامل پاسخگم به اکسین تحت نور LED
۲۹۱	۱۰-۲-۲ القاء بیان ژن‌های بیوسنتزی مسیر کاروتنوئیدها تحت نور LED
۲۹۳	۱۰-۲-۳ تنظیم بیان ژن‌های درگیر در مسیر بیوسنتزی فلاونوئیدها بواسطه‌ی تابش LED
۲۹۷	۱۰-۲-۴ اثر LED روی بیان ژن‌های مرتبط با متابولیسم آسکوربات
۳۰۰	۱۰-۲-۵ پاسخ‌های دفاعی القاء شده توسط لامپ‌های LED و رونوشت ژن‌های دفاعی
۳۰۱	۱۰-۳ نتیجه‌گیری
۳۰۳	منابع

۳۰۹	فصل ۱۱: اثر نور LED بر باززایی درون شیشه‌ای گیاه و تعادل اکسایش-کاهش سلولی مربوط به آن
۳۰۹	۱۱-۱ مقدمه
۳۱۲	۱۱-۲ اثر نور LED بر باززایی درون شیشه‌ای گیاهان
۳۱۳	۱۱-۳-۱ اثرات نور LED بر شاخه‌زایی و نمو درون شیشه‌ای گیاهچه‌ها
۳۱۶	۱۱-۳-۲ اثر LED بر چنین‌زایی بدنی
۳۱۸	۱۱-۳-۳ اثر تابش LED بر سازگار کردن بیرون شیشه‌ای گیاهان

پیشگفتار

ما در آغاز یک انقلاب فناوریانه هستیم که تأثیر طولانی مدت گسترده‌ای بر تمام زندگی ما خواهد گذاشت. در سرتاسر جهان بیشتر سیستم‌های روشنایی در حال گذار از فناوری‌های سنتی نظیر لامپ‌های رشته‌ای، فلورسنت، مثال هالید و سدیمی کم فشار و پرفشار به سمت روشنایی دیودهای منتشر کننده‌ی نور (LED) هستند. پیش‌بینی شده است که در ایالات متحده‌ی آمریکا، فناوری روشنایی LED بودجه‌ی کلی انرژی که شامل کل مصرف اولیه‌ی انرژی است را تا سال ۲۰۳۵ به میزان ۵ درصد کاهش دهد. صرف نظر از کاهش هزینه‌های مرتبط با کاهش کربن دی اکسید، این صرفه‌جویی بطور سالانه که معادل حدود ۵۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۳۵ خواهد بود کار گرایی محسوب می‌شود.

در حالی که دلیل اصلی این گذار، بهبود کارآمدی انرژی و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی بود، پیشنهاد ارزش‌گذاری برای فناوری روشنایی LED از این دلیل اولیه و مهم بسیار فراتر رفت. فناوری LED نه تنها از منابع مبتنی کارآمدتر است، بلکه عمر طولانی‌تری دارد و می‌تواند عملکرد روشنایی را بهبود دهد. با توجه به کارایی بهتر، LEDها از نظر عملیاتی خنک‌تر هستند و باعث کاهش بار حرارتی سیستم‌های گرمایش، کولینگ و گردش هوا می‌شوند. اندازه‌ی منبع نوری آنها کوچک‌تر است و امکان کنترل بهتر توزیع نور را فراهم می‌کنند. آنها می‌توانند ۵۰,۰۰۰ ساعت یا بیشتر دوام بیاورند و به صورت لحظه‌ای روشن و خاموش شوند و از اساس قابل تنظیم هستند. چگالی توان طیفی نور منتشر شده می‌تواند به خوبی مهندسی شده و حتی قابل تنظیم باشد. در این زمان یعنی اوایل سال ۲۰۱۷، بیشتر تجهیزات مبتنی بر LED به دلیل هزینه، مشخصات ظاهری^۱ یا مسائل مهندسی همه‌ی مزایای ذکر شده را ندارند، اما مصرف کنندگان یاد می‌گیرند که انتظار بیشتری داشته باشند و توسعه دهندگان فناوری LED به سرعت میزان نور را با مصالحه‌های کمتری بهبود بخشند.

همان پیشرفت‌های فناوریانه که باعث بهبود روشنایی برای کاربردهای معمول می‌شوند، می‌توانند به سایر برنامه‌های روشنایی، نظیر کاربرد LED در کشاورزی یا محیط کنترل شده نیز

اضافه شوند. فناوری روشنایی LED موجب کنترل بیشتر بر محیط شده و می‌تواند بهره‌وری و کنترل محصولات باغبانی را بهبود بخشد. نور LED حتی ممکن است امکان کشت کارآمد محصولات جدید در محیط‌های کنترل شده را فراهم کند. سطوح جدید کنترلی بر توزیع توان طیف، توزیع شدت نور، مشخصات ظاهری و تنظیم فعال رنگ، می‌توانند برای تنظیم نور مورد نیاز هر محصول، جهت بهبود بهره‌وری و کنترل جنبه‌های رشد گیاه نظیر ارتفاع، شادابی، رنگ و یا محتوای تغذیه‌ای بکار گرفته شوند. همپای بررسی اثر این سطوح جدید کنترلی بر رشد و نمو گیاهان و علی‌رغم افزایش میزان نور، هزینه‌ی تجهیزات روشنایی LED بطور مرتب کاهش می‌یابد.

نه تنها می‌توان از ویژگی‌های نورپردازی با LED برای بهبود تولید استفاده کرد بلکه از این کنترل جدید می‌توان به عنوان یک ابزار تحقیقاتی بسیار قابل تنظیم برای بازساخت دانش ما در مورد واکنش‌های فیزیولوژیک گیاه به نور به سرعت استفاده کرد. این کتاب آخرین تحقیقات در مورد گیاهان و واکنش‌های فیزیولوژیک آنها به نور را همپای پیشرفت در فناوری روشنایی LED مرور کرده است. طیف وسیعی از پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاهان به نور در گسترده‌ی وسیعی از گونه‌های گیاهی و ارقام گزارش شده است و اکنون ما کنترل وسیعی بر ویژگی‌های نوری که آنها از نظر رنگ، شدت، توزیع نوری و تغییرات این عوامل در طول زمان تجربه کرده‌اند، داریم. درک و استفاده از تأثیرات روشنایی LED در کشاورزی به تلاش‌های تحقیقاتی طولانی مدت نیاز دارد. این کتاب طیف وسیعی از نتایج تحقیقاتی مرتبط با ویژگی‌های روشنایی، واکنش‌های فیزیولوژیک گیاهی و سلولی و حتی اقتصاد روشنایی برای کشاورزی در محیط‌های کنترل شده را گردآوری کرده است. تجهیزات LED دارای قابلیت تنظیم، در حال حاضر نسبتاً ارزان هستند و به پژوهشگران در سرتاسر جهان این امکان را می‌دهد تا آزمایش‌های قابل ملاحظه‌ای انجام دهند و به دنیای علم این موضوع مهم را اضافه کنند. پژوهشگران دانشگاهی، تجاری و همچنین پژوهشگران جوان^۱ می‌توانند از تحقیقات تشریح شده در این کتاب به عنوان نقطه‌ی شروع تلاش‌های تحقیقاتی خود استفاده کنند.

این کتاب توسط پیشگامانی که ظهور تکنولوژی LED برای کشاورزی با محیط کنترل شده را در سراسر جهان رهبری می‌کنند، تدوین شده است. این فصل‌ها سلسله‌ای از ویژگی‌های اساسی LED و کاربرد آنها در سیستم روشنایی تکمیلی، اقتصاد و کاربردهای مختلف در کشاورزی با

محیط کنترل شده و نقش آنها را در تنظیم ریختزایی گیاه هم در شرایط برون شیشه‌ای و هم در شرایط درون شیشه‌ای پوشش می‌دهند. من اطمینان دارم که کتاب حاضر دانشمندان علوم گیاهی و بیوتکنولوژیست‌ها را ترغیب می‌کند تا وارد زمینه‌ی جذاب کاربرد فناوری روشنایی نیمه هادی برای بهبود رشد و نمو گیاه شوند.

استفاده از روشنایی LED برای کاربردهای کشاورزی/باغبانی پیامدهای عمیقی برای جهان ما دارد. روشنایی LED یکی از مؤلفه‌های اصلی و توانمندساز کشاورزی در محیط کنترل شده است که امکان پرورش محصولات در مناطق جدید جهان و در هر زمان از سال فراهم می‌کند. این امر با توجه به بازار هدف، چگونگی انتخاب محصول و مکان پرورش محصول را تغییر می‌دهد. نهاده‌های انرژی، آب، مواد شیمیایی و مواد مغذی مورد نیاز برای رشد گیاه نیز با اتخاذ کشاورزی در محیط کنترل شده به طور چشمگیری تغییر می‌کنند. به احتمال زیاد، تأثیرات طولانی مدت اتخاذ این سیستم روی عرضه‌ی جهانی مواد غذایی تولید محلی‌تر، افزایش خودکفایی، مواد غذایی بیشتر در طول سال و افزایش فرصت تولید مواد غذایی در مقیاس کوچک خواهند بود. با این حال، پیش‌بینی کامل تأثیر جهانی کشاورزی در محیط کنترل شده با نور LED و دانش نقش نور در ریختزایی گیاه دشوار است؛ هر چند قطعاً پرورش محصولات تحت LED می‌تواند نقش قابل ملاحظه‌ای در چگونگی تأمین غذا در جهان برعهده گیرد و درک مفاهیم ارائه شده در این کتاب برای تحقق یافتن این چشم انداز، بسیار حیاتی است.

دکتر پی. مورگان پاتیسون

رئیس و بنیانگذار شرکت سرویس‌های روشنایی حالت جامد

مشاور ارشد فنی وزارت انرژی ایالات متحده برای برنامه‌ی تحقیق و توسعه‌ی روشنایی حالت جامد،
واشنگتن، ایالات متحده آمریکا