

آشنایی با شاخص های اساسی چراغ های رشد گیاه

Application Note

ناشر:

واحد نورپردازی کشاورزی و گلخانه ای

تاریخ انتشار:

۱۴۰۱/۰۹/۲۳

کارشناس:

شکوفه اشرفی | sh.ashrafi@sayanelectric.com



SAYAN
ELECTRIC

منتشر شده توسط واحد نورپردازی کشاورزی و گلخانه ای
منطقه آزاد تجاری صنعتی ارس-جلفا- شهرک صنعتی
ایمیل: info@sayanelectric.com
تلفن تماس: ۰۲۱-۲۶۲۹۱۹۷۱
وبسایت: www.sayanelectric.com
شبکه های اجتماعی: @sayanelectric
© کلیه حقوق محفوظ است.

آشنایی با شاخص های اساسی چراغ های مخصوص رشد گیاه

Application Note No. ANSE-H001



خلاصه

امروزه در دنیای صنعت کشاورزی و باغبانی، نور مکمل رشد گیاه نقش بی نظیری ایفا می کند که منابع نوری این حوزه با عنوان چراغ های گلخانه ای یا چراغ های مخصوص رشد گیاه شناخته می شوند. این نوآوری نه تنها توجه صنعت کشاورزی را جلب کرده است بلکه با توجه به مزیت های بسیاری زیادی که بوجود آورده، روش های کشاورزی و زراعت را نیز تغییر داده است. در گذشته نه چندان دور، افراد از شاخص های کیفی و کمی عمومی مانند لومن، لوکس و وات برای ارزیابی نور رشد گیاه استفاده می کردند، اما اینکه نور چگونه بر روی گیاهان تأثیر می گذارد، یک جهان جدید و تخصصی را با خود به همراه دارد. در این راهنمای کاربردی، با شاخص ها و فاکتورهای اساسی نور رشد گیاه، آشنا می شوید تا انجام محاسبات، طراحی و استفاده از سیستم های نورپردازی کشاورزی فضاهای کشت و گلخانه ای خود را به نحو احسن مدیریت کرده و یک خرید مطمئن با افزایش بهره وری بهینه داشته باشید.

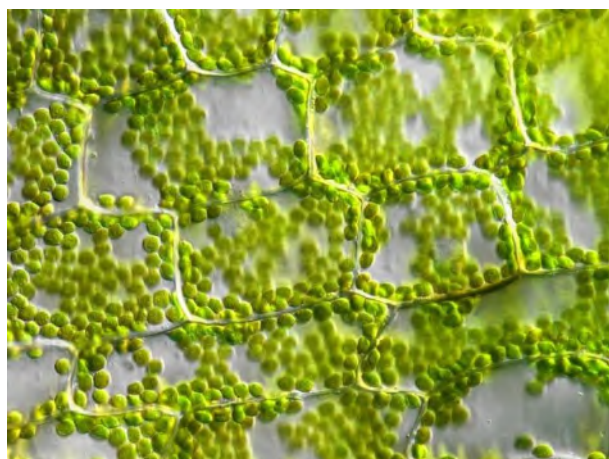
فهرست

۰۳	.....	تابش فعال فتوسنتزی (PAR)
۰۴	.....	اشتباه در اندازه گیری نور رشد گیاه
۰۸	.....	شار فتون فتوسنتزی (PPF)
۰۸	.....	اندازه گیری صحیح PPF
۱۰	.....	چگالی شار فوتون فتوسنتزی (PPFD)
۱۴	.....	نکات مهم پخش نور بر روی گیاهان
۱۶	.....	شار فوتون کارا (YPF)
۱۹	.....	نورپردازی مکمل برای گیاهان در گلخانه
۱۹	.....	رابطه بین انرژی و نور
۲۱	.....	انتگرال نور روزانه (DLI)
۲۲	.....	بهره وری فوتونی
۲۲	.....	جمع بندی
۲۴	.....	منابع

تابش فعال فتوسنتزی (PAR)

PAR مخفف عبارت Photosynthetically Active Radiation می باشد و همانطور که از نام آن پیداست، به تشعشعات جذب شده توسط گیاهان برای انجام فرآیند فتوسنتز اشاره دارد که البته یک واحد اندازه گیری یا معیار متریک مانند فوت، اینچ یا کیلوگرم نیست. PAR نوع نور را براساس طیف نوری ایی که در آن گیاهان بهترین واکنش را به نور با انجام عمل فتوسنتز نشان می دهند، مشخص می کند. در واقع PAR محدوده طیفی (باند موج) تابش خورشیدی از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است که موجودات فتوسنتزی قادر به استفاده از آن در فرآیند فتوسنتز هستند. این ناحیه طیفی کم و بیش با محدوده نور قابل مشاهده برای چشم انسان مطابقت دارد.

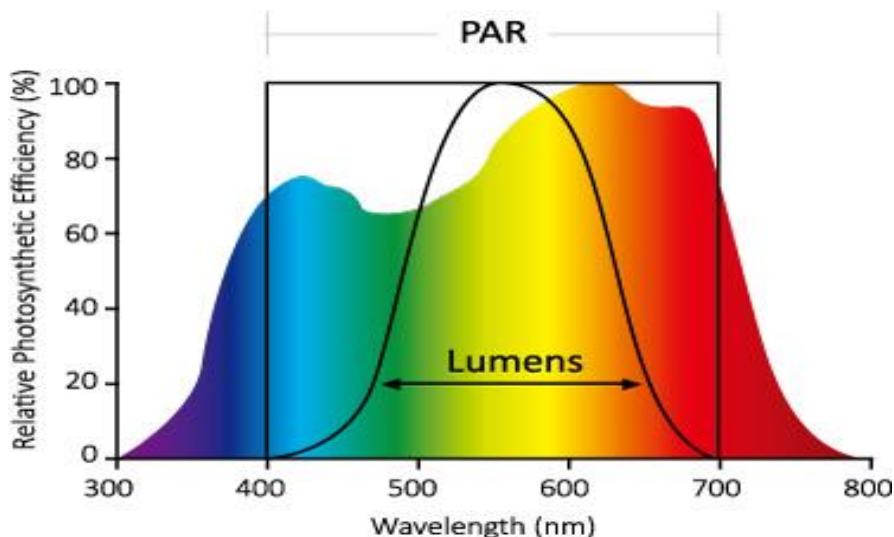
گیاهان از طریق فتوسنتز، انرژی نور را به انرژی شیمیایی تبدیل می کنند، که این انرژی شیمیایی غذایی است که گیاهان برای رشد و شکوفایی استفاده می کنند. فتوسنتز فرآیندی برای حفظ حیات گیاهان است.



کلروفیل یا سبزینه، مولکول یا ماده‌ای شیمیایی است که در برگ و ساقه تقریباً تمام گیاهان وجود دارد. وظیفه کلروفیل، فتوسنتز است، به این معنی که دی‌اکسید کربن موجود در هوا را با آب مکش شده توسط ریشه گیاه از زمین را در حضور نور ترکیب می‌کند و قند (کربوهیدرات) و اکسیژن می‌سازد یا به‌طور ساده گیاه را توانا می‌سازد که از نور خورشید انرژی کسب کند. کلروفیل بخش بزرگ نور آبی و قرمز را جذب، و نور سبز و زرد را از بین طیف‌های الکترومغناطیسی بازتاب می‌کند. رنگ سبز گیاهان به دلیل بازتاب نور سبز از کلروفیل‌هاست. عملیات فتوسنتز باعث سبز ماندن گیاهان می‌شود. انواع مختلفی از کلروفیل در گیاهان، جلبک‌ها و باکتری‌ها وجود دارد که در گیاهان، نور عمدتاً با کلروفیل a و b واکنش می‌دهد.

شکل شماره ۱- تصویر میکروسکوپی از وجود مولکول‌های کلروفیل در یک گیاه

تشعشع‌های خورشیدی جذب شده برای فرآیند فتوسنتز در محدوده طول موج 400-700 نانومتر، یعنی طیف نور مرئی قرار دارند. این محدوده یک رنج بهینه ای است که برای موجودات زنده مضر نیست. طول موج‌های کوتاه‌تر به سلول‌ها آسیب می‌رساند و توسط لایه ازن فیلتر می‌شوند و همچنین طول موج‌های بلندتر انرژی کمتری برای انجام عمل فتوسنتز دارند (هرچه طول موج بیشتر، انرژی کمتر). پس PAR در محدوده طول موج 400 [nm] تا 700 [nm] قرار دارد. محدوده PAR برای رشد انواع گیاهان متفاوت است. گیاهان مختلف به مقادیر متفاوتی از نور نیاز دارند. به‌طور کلی، گیاهان نور خورشید را ترجیح می‌دهند، زیرا نور خورشید طیف کاملی از PAR را ارائه می‌دهد. با این حال باتوجه به تغییرات فصول، شرایط جغرافیایی و توجه به افزایش بهره‌وری محصول، نور مصنوعی بعنوان نور مکمل برای رشد گیاهان استفاده شود. در شکل ۲ محدوده طول موج قابل درک برای انسان (lumens) و قابل درک برای گیاهان (PAR) را مشاهده می‌کنید. در ادامه خواهید دید، نوری را که در محدوده زون PAR قرار دارد و روی محصول می‌افتد را اندازه‌گیری می‌کنیم و با شاخص PPFD یا چگالی شار فوتون فتوسنتزی که بر حسب میکرومول در هر متر در هر ثانیه ($\frac{\mu\text{mol}}{\text{sm}^2}$) بیان می‌شود، نشان می‌دهیم- تعاریف شاخص PPFD و سایر شاخص‌های مهم را در ادامه مشاهده خواهید کرد.



شکل ۲- محدوده ی طیفی زون PAR قابل درک برای گیاهان و زون نور قابل درک برای انسان

پس در حوزه کشاورزی و باغبانی، PAR به بخشی از طیف الکترومغناطیسی اطلاق می شود که قادر به تحریک فتوسنتز در گیاهان است. معمولاً به عنوان منطقه ای بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر (nm) تعریف می شود که طول موج های مرئی نور را در بر می گیرد. PAR برای گیاهان ضروری است تا نور خورشید را به انرژی تبدیل کنند و آنها را قادر به رشد، توسعه و تولید غذا کند.

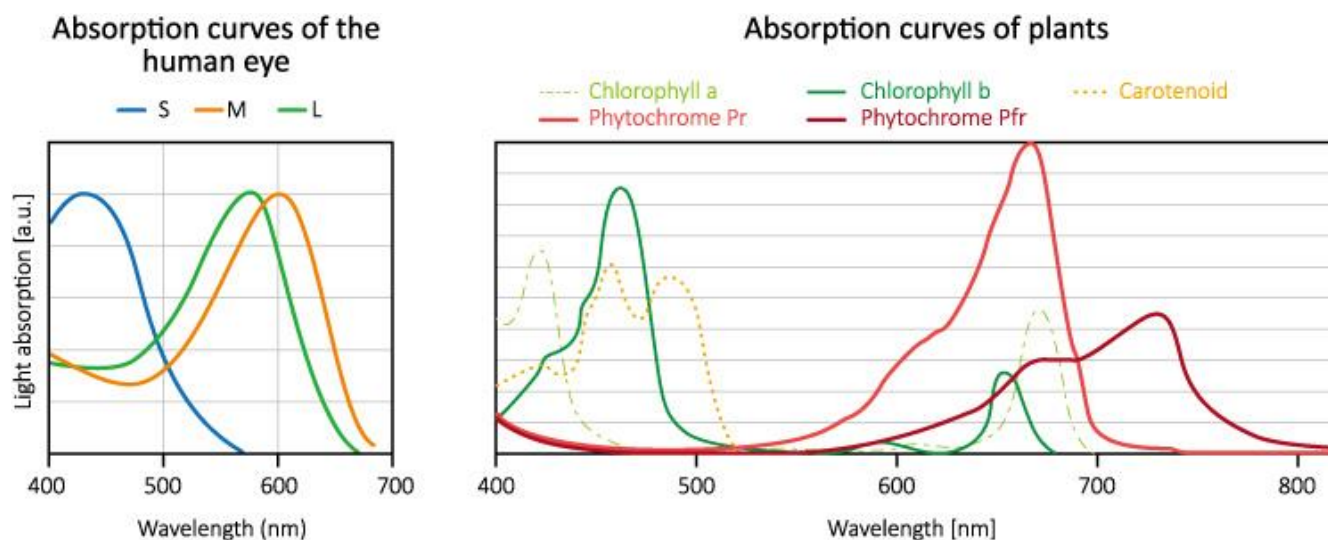
اشتباه در اندازه گیری نور رشد گیاه

در گذشته (و یا حتی امروزه) به اشتباه همواره سطح نور گلخانه ها را با لوکس (LUX) بیان می کردیم در حالیکه لوکس و لومن معیار اندازه گیری نور درک شده توسط چشم انسان است که به نور سفید واکنش نشان می دهد. PAR یک محدوده و معیار اندازه گیری دقیق تری از لوکس و لومن ارائه می دهد. لوکس یک واحد اندازه گیری شدت روشنایی است که توسط چشم انسان قابل درک است. در حالیکه، PAR فقط نور مرئی را اندازه گیری نمی کند، بلکه نور ماوراء بنفش و مادون قرمز را نیز اندازه گیری می کند که برای فتوسنتز گیاهان ضروری هستند.

در حالی که می توان از لوکس برای اندازه گیری شدت نور کلی استفاده کرد، اما بین طول موج های مختلف نور تفاوتی قائل نمی شود. اندازه گیری در PAR نمایش دقیق تری از نوری که در واقع برای فتوسنتز در دسترس است را ارائه می دهد.

چشمان ما دارای سه نوع گیرنده نور هستند، گیرنده های S ، M و L که عمدتاً به نور آبی، سبز و زرد واکنش نشان می دهند. منحنی که در آن لومن و لوکس اندازه گیری می شود در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که می بینید نقطه شروع و پایان این منحنی (Lumens)، شبیه نقطه شروع و پایان محدوده PAR است، اما نور آبی و نور قرمز در منحنی Lumens به اندازه ی زمانی که نورپردازی گیاهان را اندازه گیری می کنیم، در نظر گرفته نمی شوند.

باتوجه به منحنی جذب نور توسط انسان و گیاه (شکل ۳) مشاهده می شود، گیاهان نور را در طول موج های آبی و قرمز به بهترین شکل ممکن جذب می کنند. به همین دلیل است که گیاهان اغلب سبز به نظر می رسند، زیرا نور سبز تنها نوری است که آنها جذب نمی کنند. از سوی دیگر، انسان نور را مانند گیاهان جذب نمی کند. انسان ها سلول های گیرنده نوری در چشمان خود دارند که به طول موج های مختلف نور حساس هستند. این سلول ها نور دریافتی خود را به سیگنال های الکتریکی تبدیل می کنند که به مغز ارسال می شود. مغز این سیگنال ها را به صورت رنگ تفسیر می کند. انسان ها می توانند نوری با طول موج های بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر را ببینند. این به عنوان طیف مرئی شناخته می شود.



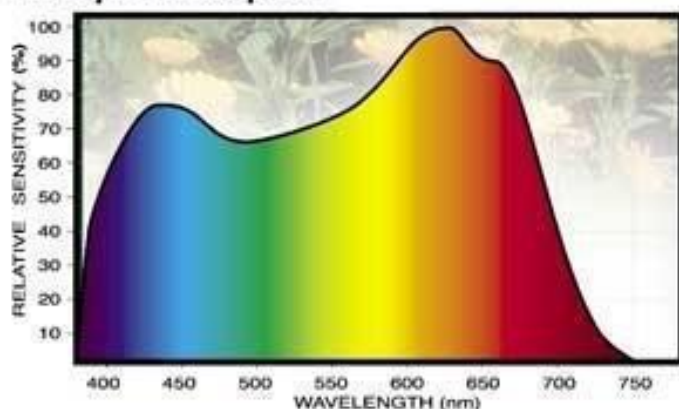
شکل ۳- منحنی جذب نور گیاهان و منحنی جذب نور چشم انسان

در اینجا جدولی وجود دارد که تفاوت های کلیدی بین جذب نور توسط گیاه و انسان را خلاصه می کند:

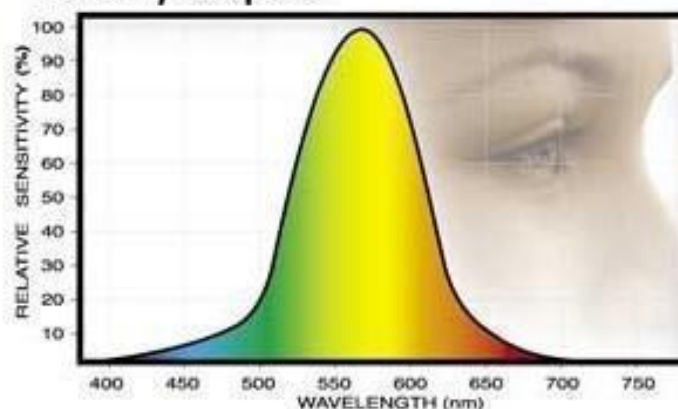
ویژگی	انسان	گیاه
هدف از جذب نور	مشاهده	فتوسنتز
بیشترین طول موج جذب شده	(طیف مرئی) 400-700 nm	قرمز، آبی
بهره وری جذب نور	پایین	بالا
تبدیل انرژی فوتون	سیگنال های الکتریکی	انرژی شیمیایی

همانطور که گیرنده های چشم انسان (photoreceptor) نور را جذب و درک می کنند، کلروفیل a و b نیز در گیاهان وظیفه درک نور را بر عهده دارد. در شکل ۴ تفاوت بین حساسیت نوری چشم انسان و حساسیت نوری گیاهان را مشاهده می کنید. عبارت بهتر نوری که انسان درک می کند با نوری که گیاه درک می کند متفاوت است. طبق شکل ۴ طول موج های حدود ۴۶۰ نانومتر (آبی) و حدود ۶۶۰ نانومتر بیشتر توسط گیاهان درک می شود و در نتیجه تولید کلروفیل گیاهان با فوتون های نور آبی و قرمز بهتر صورت می گیرد، این موضوع ربطی به بالا یا پایین بودن طول موج و یا سطح انرژی طول موج ندارد و یک موضوع ذاتی مربوط به ساختار گیاهان است. با توجه به تفاوت درک نور توسط انسان و گیاه، دیگر نمی توانیم سطوح نوری چراغ های LED رشد گیاهان را همانطور که قبلا با واحد لوکس اندازه گیری می کردیم، بسنجیم. بنابراین جدیدترین معیار اندازه گیری بر حسب $(\frac{\mu\text{mol}}{\text{s.m}^2})$ بیان می شود و شامل تمام فوتون های نوری محدوده ۴۰۰ نانومتر تا ۷۰۰ نانومتر می شود که در ادامه درمورد این شاخص ها بیشتر توضیح می دهیم.

Photosynthetic Response



Human-Eye Response



شکل ۴- تفاوت محدوده درک انسان و گیاهان از نور



بنابراین باتوجه به محدوده اندازه گیری لوکس متر که شدت روشنایی قابل درک توسط انسان را اندازه گیری می کند (illuminance) مقدار نوری که بر واحد سطح تابیده می شود)، برای اندازه گیری شدت روشنایی درک شده توسط گیاه از دستگاه پارمتر (PAR Meter) استفاده می شود. PAR متر، که با عنوان "حسگر کوانتومی" نیز شناخته می شود، شدت نور، میزان تابش الکترومغناطیسی محدوده PAR، زیر یک یا چندین منبع نور را اندازه گیری می کند. تعدادی اپلیکیشن گوشی هوشمند نیز وجود دارد که ادعا می کنند به شما امکان اندازه گیری PAR (تشعشع فعال فتوسنتزی، طول موج نوری که گیاهان را رشد می دهد) را می دهد.

شکل ۵- یک دستگاه پارمتر برای اندازه گیری نور درک شده توسط گیاه

شدت PAR بر حسب واحد میکرومول فوتون در هر متر مربع در ثانیه ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) اندازه گیری می شود. مقدار PAR بالاتر نشان دهنده در دسترس بودن بیشتر نور برای فتوسنتز است. سطوح PAR بهینه برای رشد گیاه بسته به گونه گیاهی و مرحله رشد متفاوت است. به عنوان مثال، برخی از گیاهان برگ دار معمولاً به سطح 300-400 PAR میکرومول در متر مربع بر ثانیه نیاز دارند. اندازه گیری PAR برای اطمینان از اینکه گیاهان شدت نور مناسب را برای رشد و بهره وری بهینه دریافت می کنند، بسیار مهم است.

PAR مترها دستگاه های دستی هستند که به طور خاص برای اندازه گیری سطوح PAR طراحی شده اند. آنها به طور گسترده در گلخانه ها، مزارع سرپوشیده، کشت طبقاتی و سیستم های کشت هیدروپونیک برای بهینه سازی استراتژی های روشنایی و به حداکثر رساندن محصول استفاده می شوند. با اندازه گیری منظم PAR در گلخانه یا فضای رشد خود، می توانید اطمینان حاصل کنید که گیاهان شما نور مورد نیاز برای رشد را دریافت می کنند. این می تواند به بهبود سلامت گیاه، افزایش عملکرد و کاهش مصرف انرژی کمک کند.

شار فوتون فتوسنتزی (PPF)

PPF یا "شار فوتون فتوسنتزی" مخفف عبارت Photosynthetic Photon Flux می باشد که کل مقدار نوری که در زون PAR است و توسط یک منبع نوری در هر ثانیه تولید می شود را نشان می دهد. بنابراین PPF، فوتون های فعال فتوسنتزی ساطع شده توسط یک سیستم روشنایی در هر ثانیه را اندازه گیری می کند که بر حسب میکرومول بر ثانیه $\frac{\mu\text{mol}}{\text{s}}$ بیان می شود.

با در دست داشتن PPF یک چراغ رشد گیاه، می توان محاسبه کرده و تخمین زد که برای دستیابی به سطح نور مورد نیاز بر روی گیاهان، به چند لامپ در هر بخش از آن فضا نیاز داریم. به عنوان مثال یک پرورش دهنده توت فرنگی را در نظر بگیرید که قصد دارد یک کشت زمستانی با سطح نور $200 \frac{\mu\text{mol}}{\text{s.m}^2}$ بر روی گیاه انجام دهد. با یک سقف پوششی ۸ متری و فاصله ۵ متری دیرک ها، هر ناحیه رشد گیاه 40 m^2 می باشد. بنابراین ما در مجموع به $8000 \mu\text{mol/s}$ نور برای این ناحیه نیاز داریم:

$$40 \text{ m}^2 \times 200 \frac{\mu\text{mol}}{\text{s.m}^2} = 8000 \mu\text{mol/s}$$

اگر یک چراغ LED رشد گیاه، PPF برابر $2000 \frac{\mu\text{mol}}{\text{s}}$ تولید کند، به ۴ لامپ در این ناحیه رشد نیاز دارید.

البته توجه کنید که PPF نمی تواند مشخص کند، واقعاً چه مقدار از نور ساطع شده از منبع نوری روی گیاهان یا هر سطح دیگری می نشیند. بنابراین به خاطر داشته باشید که چراغ های متفاوت با PPF یکسان بهره وری یکسانی در نشان دادن نور بر روی محصولات کشاورزی ندارند. همچنین PPF اطلاعاتی در مورد طیف نوری و طول موج این فوتون ها به ما نمی گوید. نوع چراغ LED و چیپ های استفاده شده در آن در محاسبات بسیار حائز اهمیت می باشد

آیا اندازه گیری فعلی PPF واقع بینانه و صحیح می باشد ؟

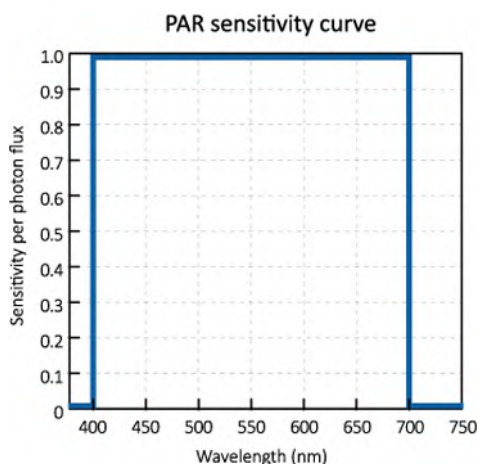


امروزه همه فوتون ها در تمام طیف ها به صورت یکسان سنجیده می شوند، که این موضوع باعث می شود مقایسه مقادیر اندازه گیری شده دشوار باشد. به عنوان مثال، مقدار PAR در لامپ HPS SON-T نسل های اخیر را در نظر بگیرید - مقدار PAR یا بهره وری که می توانید از این لامپ ها دریافت کنید می تواند تا مقدار $2.1 \frac{\mu\text{mol}}{\text{J}}$ برسد، در حالی که این مقدار عددی اطلاعاتی در مورد میزان کارایی این فوتون ها برای گیاهان برای انجام عمل فتوسنتز ارائه نمی دهد. یک چراغ LED رشد گیاه با عملکردی شبیه به لامپ نمونه ذکر شده در فوق که با طول موج فوتونی مناسب مرحله محصول دهی و رشد گیاه مطابقت دارد، ممکن است ۲۵ درصد بهبود در رشد گیاه ایجاد کند. بنابراین روش امروزی برای سنجش همه فوتون ها با طیف PAR یکسان، واقعاً مناسب و شایسته نیست.

شکل ۱- یک لامپ HPS SON-T مناسب برای رشد گیاه

وضعیت اندازه گیری فعلی

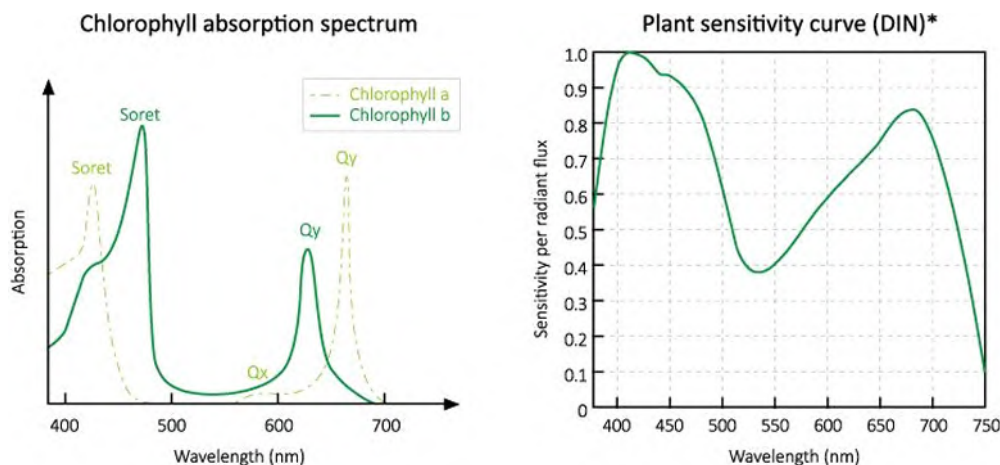
تمام طیف ها به طور مساوی با شمارش فوتون های موجود در ناحیه فعال فتوسنتزی سنجیده می شوند (PAR) و در واقع شمارش تعداد فوتون های نوری فارغ از اینکه در چه طول موجی هستند، اندازه گیری می گردند.



شکل ۷- منحنی حساسیت PAR

رویکرد واقع بینانه تر اندازه گیری

در یک رویکرد واقعی تر، سنجش فوتون های لامپ ها را بر اساس منحنی حساسیت طیفی گیاهان ("plm/W") انجام می دهند. این منحنی از طیف جذب کلروفیل با در نظر گرفتن فرآیندهای انتقال انرژی داخلی گیاه و برگها استخراج شده است در بخش های ابتدایی به آن اشاره ای کردیم.



شکل ۸- طیف جذب کلروفیل و منحنی حساسیت گیاه

البته امروزه این روش مورد استفاده قرار نمی گیرد، زیرا تفاوت های بسیار زیادی از یک گیاه به گیاه دیگر در نحوه جذب نور و در اینکه در کدام طیف رنگی بهترین واکنش در آن گیاه صورت می گیرد، وجود دارد و این روش هم کار اندازه گیری شاخص ها را بسیار پیچیده می کند.

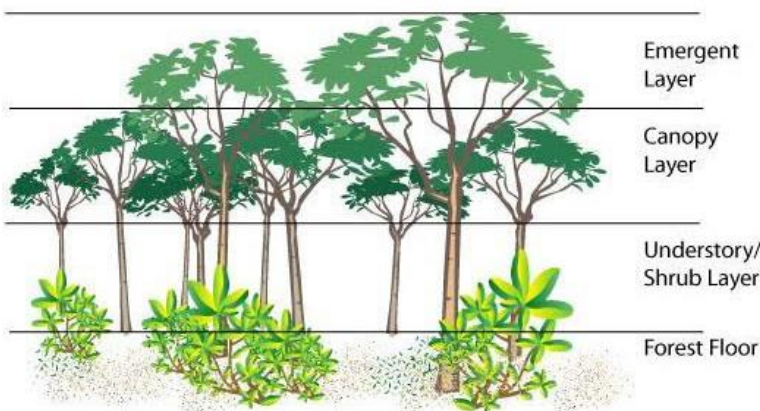
اما از آنچه در اینجا یاد گرفتید، به خاطر داشته باشید که فقط نگاه کردن به PPF یک لامپ ارزش علمی و فنی خاصی ندارد، زیرا باید به ازای هر محصول زراعی، منحنی حساسیت گیاه و منحنی پخش نور چراغ را بررسی کنید و تا حد امکان نوری با انرژی ایی مطابق با این منحنی حساسیت گیاه ایجاد کنید. شرکت سایان الکتریک با تیم جوان و متخصص در این حوزه می تواند به شما مشاوره تخصصی ارائه دهد تا بهترین نورپردازی برای محصول زراعی خود داشته باشید.

همچنین به خاطر داشته باشید که طول موج های بالای ۷۰۰ نانومتر که تأثیر عمده ای بر Pfr فیتوکروم دارند، در اعداد PAR به حساب نمی آیند، همچنین نور UV و طول موج های زیر ۴۰۰ نانومتر نیز در نظر گرفته نمی شوند. فوتون های نوری بالای ۷۰۰ نانومتر، که معمولاً NIR یا FAR Red نامیده می شوند، می توانند مزایای عمده ای در برخی از مراحل محصول دهی و مراحل رشد داشته باشند. یک نمونه خوب که می توان به آن اشاره کرد مربوط به کشت خیار می باشد، که در پروژه های مورد آزمایش با نور FAR Red اضافی تا ۴۳ درصد بازده بالاتری را توانستند از پروژه بگیرند.

چگالی شار فوتون فتوسنتزی (PPFD)

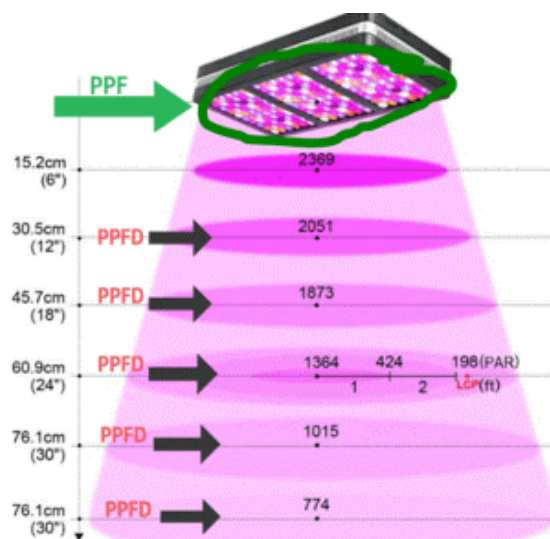
چگالی شار فوتون فتوسنتزی (PPFD)، میزان نور زون PAR که واقعا به کونوپی محصول، می رسد را اندازه گیری می کند و در واقع مقدار نور ساطع شده در محدوده زون PAR است که واقعا به گیاهان، می رسد یا بعبارت دیگر تعداد فوتون های فعال فتوسنتزی است که در هر ثانیه روی سطح گیاه می افتند، می باشد. PPFD بر حسب $\frac{\mu\text{mol}}{\text{s.m}^2}$ بیان می شود. امروزه بهترین معیار موجود برای مقایسه چراغ های رشد گیاه موجود در بازار است.

تعریف: کونوپی (Conopy) در اصل به معنای قسمتی از گیاهان است که بالای سطح زمین قرار دارد، و یک ظاهر سقفی مانند برای گیاه ایجاد می کند که به عنوان کونوپی شناخته می شود.



شکل ۱۰- لایه های مختلف گیاهان و مشاهده لایه کونوپی گیاه

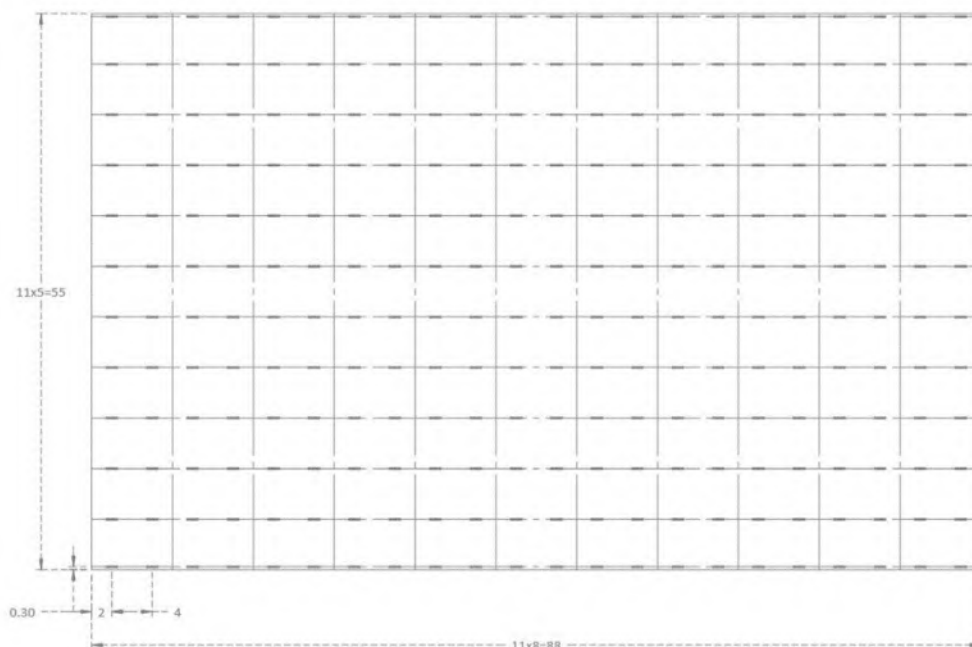
نور با حرکت از منبع نوری (چراغ) به سمت نقطه پایانی (بر روی گیاه) قدرت خود را از دست می دهد. در بیشتر نمودارهای شدت نور چراغ های رشد، مشاهده خواهید کرد که با افزایش فاصله از منبع نوری، مقدار PPFD کاهش می یابد. به همین دلیل است که توجه به ارتفاع آویز چراغ های رشد بسیار حایز اهمیت است. در شکل زیر مفهوم PPF و PPFD را برای یک رشد نمونه مشاهده می کنید.



شکل ۱۱- مفهوم PPF و PPFD و ارتباط آن با فاصله آو

در رابطه با چراغ های رشد گیاه، سازنده آن، PPF یا خروجی نور مربوط به زون PAR چراغ را مشخص می کند. با توجه به نحوه پخش نور چراغ یا لامپ و وضعیت قرارگیری فیزیکی لامپ ها در هر پروژه، می توان PPFD را محاسبه کرده و بدست آورد. به راحتی می توانید ببینید که چراغ هایی با سطح نور (PPF) مشابه گاهی اوقات نتایج مشابهی را در رابطه با میزان PPFD دریافتی روی محصولات نمی دهند، که عمدتاً این موضوع ناشی از تفاوت در نحوه پخش نور منبع نوری و نوع چیدمان چراغ ها و مهمتر از همه کیفیت چیپ های استفاده شده در چراغ می باشد.

در صفحه بعد نمونه ای از پروژه توت فرنگی با ۲ لامپ CoolStack Boost که در هر ۴۰ متر مربع و زیر داربست قرار داده شده است، را می بینید.

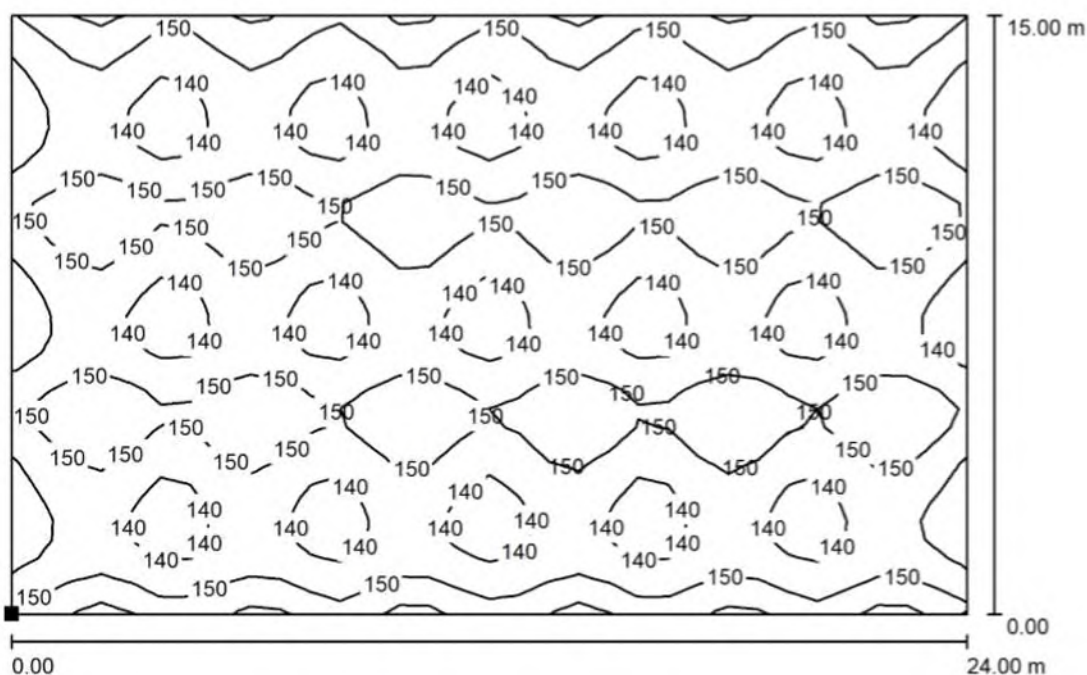


شکل ۱۲- ابعاد و نحوه چیدمان چراغ های رشد گیاه در یک گلخانه توت فرنگی

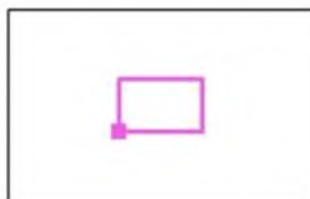
این چراغ بصورت شکل ۱۴ در یک گلخانه توت فرنگی نصب شده است که در آن مقادیر اندازه گیری شده شاخص ها را مشاهده می کنید.



شکل ۱۳- نمونه ای از یک چراغ CoolStack Boost مخصوص رشد گیاه



Position of surface in room:
Marked point:
(32.000 m, 20.000 m, 0.000 m)



Grid: 32 x 32 Points

E_{av} [umol]
146

E_{min} [umol]
139

E_{max} [umol]
152

$u0$
0.960

E_{min} / E_{max}
0.914

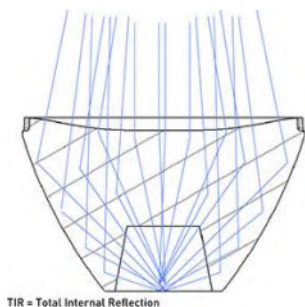
شکل ۱۴- مقدار شاخص های اندازه گیری شده در گلخانه مثال فوق

یکی از خدمات شرکت سایان الکتریک انجام محاسبات و شبیه سازی پروژه های مختلف برای گلخانه های صنعتی، مراکز کشت بافت، واحد های کشت طبقاتی و سایر موارد است که به پرورش دهندگان ارائه می شود.

نکات مهم پخش نور بر روی گیاهان

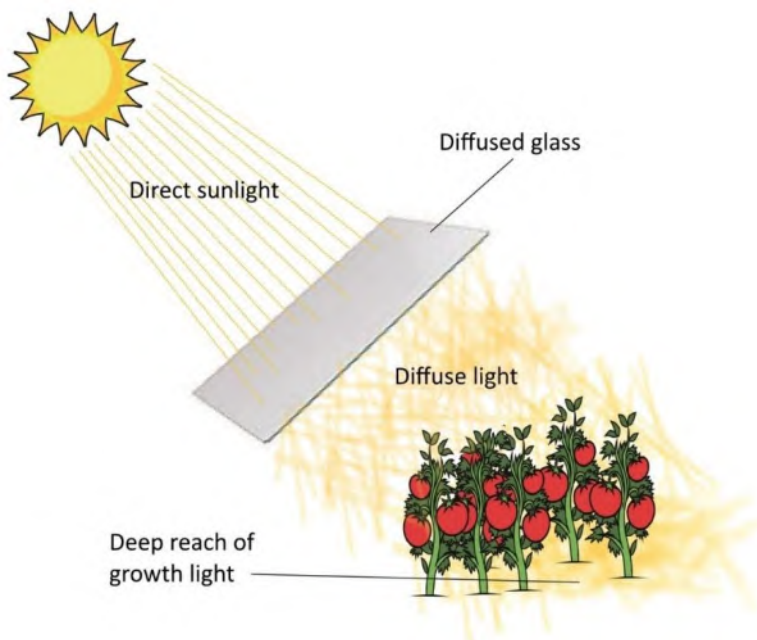
در وهله اول باید توجه کنید که نور حتماً باید به طور مساوی روی گیاهان توزیع شود. اما مطمئناً هر پروژه شرایط متفاوتی دارد، گلخانه هایی با تیرک هایی با ارتفاع کمتر از ۳/۵ متر وجود دارند، در حالی که در پروژه های جدید تیرکهای بلند ۷ متری را می توانید مشاهده کنید. بنابراین آنچه مسلم است فاصله لامپ ها تا محصول کاملاً در پروژه های مختلف متفاوت است. ارتفاع نصب چراغ ها بر میزان PPFD بسیار تاثیرگذار است.

هنگامی که مجبور هستیم از زاویه پخش نور Wide در دو پروژه با ارتفاع تیرک های متفاوت، استفاده کنیم، هرچند نور به خوبی در هر دو پروژه پخش می شود اما با وجود تیرکهای های بلند، نور زیادی به طرفین گلخانه که گیاهی در آن وجود ندارد، پرتاب می شوند و در واقع نور هدر می رود. در شکل ۱۸ نشت نور گلخانه ای که باید صرف اثر بخشی و کاهش مصرف انرژی را شود را می بینید. همچنین در پروژه با ارتفاع نصب بیشتر، نور برای رسیدن به گیاهان باید مسافت زیادی را طی کند، که طبق شکل ۱۱ از PPFD آن کاسته می می شود. بنابراین هنر نورپردازی مصنوعی صحیح گلخانه ای این است که مطمئن شوید نور در وهله اول به خوبی و با حداقل هدر رفت نوری بر روی تمام سطح گیاه و بر روی تمامی قسمت های محصول توزیع شود و در وهله دوم از ریزش حداکثری نور و تا حد امکان ریزش مستقیم نور بر روی گیاهان با کمترین نشت نوری مطمئن شوید. موضوع گفته شده، توضیح می دهد که چرا چراغ های رشد LED با اپتیک های پیشرفته (مثل لنز) عملکرد بهتری نسبت به چراغ های بدون کنترل کننده های نوری دارند.



مشابه کاربردهایی که از نور سفید برای نورپردازی مناسب انسان دیده اید، در بحث چراغ های رشد گیاه نیز یک LED دارای پخش نور نسبتاً وسیعی می باشد (حدود ۱۲۰ درجه) و در نتیجه بدون اصلاح و ایجاد کنترل در نحوه پخش نور، توسط کنترل کننده های اپتیکی، بخش بزرگی از انرژی PPF ساطع شده، روی کونوپی و در ناحیه ای از گیاه که می خواهید فرود نمی آید. کنترل کننده های اپتیکی مثل لنزهای TIR (Totally Internal Reflection)، نفوذ و حرکت نور در کونوپی گیاهان را به روشی مشابه آنچه شیشه های دیفیوژری گلخانه ها با ایجاد پراکندگی بیشتر نور و در نتیجه توزیع همگن نور بر روی برگ گیاهان ایجاد می کند، بهبود می بخشد. در شکل ۱۶ تاثیر استفاده از شیشه های دیفیوژری در گلخانه ها را مشاهده می کنید.

شکل ۱۵- ساختار و نحوه هدایت لنز TIR بعنوان یک کنترل کننده اپتیکی

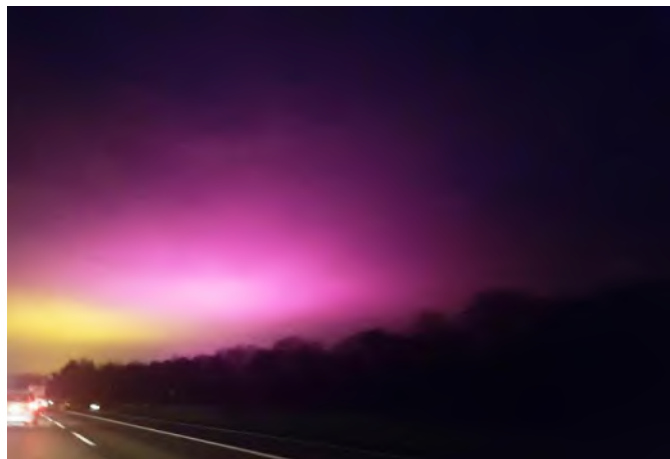


شکل ۱۶- تاثیر شیشه های دیفیوزری در پراکندگی نور و توزیع همگن نور در کونوپی گیاهان



شکل ۱۷- نور در زیر چراغ با نور دیفیوزر شده (B) (که با استفاده از کنترل کننده های نوری مثل لنزها ایجا می شود) در مقایسه با نور مستقیم (A) که در آن لکه های نوری زیادی در قسمت میانی و پایینی کونوپی دیده می شود، بیشتر به طور همگن توزیع می شود.

(Li et al., 2014a/b, photo courtesy of Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Bleiswijk)



شکل ۱۸- نشت نور گلخانه ای منجر به کاهش مقادیر PPFD و هدر رفتن انرژی بسیار زیادی می شود.

شار فوتون کارا (YPF)

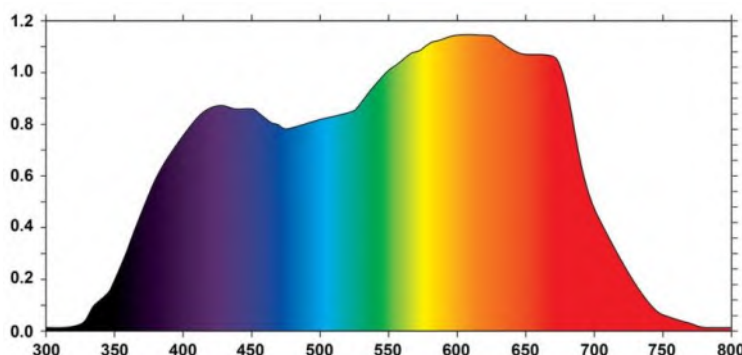
شار فوتون کارا یا YPF که مخفف عبارت Yield Photon Flux می باشد، مقدار فوتون ها را بر اساس پاسخ فتوسنتزی گیاه، برای نوری که در محدوده ۳۶۰ تا ۷۶۰ نانومتر است، می سنجد. بنابراین رنج اندازه گیری این شاخص از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر PAR فراتر بوده و فوتون ها را با توجه به منحنی حساسیت گیاه (plant sensitivity curve) برای هر محصول زراعی اندازه گیری می کند. بر خلاف PAR که فقط فوتون ها را در طیف نور مرئی ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر در نظر می گیرد و به هر فوتون به طور مساوی وزن می دهد، YPF فوتون های ۳۶۰-۷۶۰ نانومتر (فرابنفش تا مادون قرمز نزدیک) را در نظر گرفته و برای هر فوتون بر اساس پاسخ فتوسنتزی گیاه به هر طول موج وزن خاصی می دهد.

وقتی طیف نوری دقیق یک چراغ رشد مشخص باشد، مقادیر شار فوتون فتوسنتزی (PPF برحسب $\frac{\mu\text{mol}}{\text{s}}$) را می توان با اعمال ضریب وزنی مختلف به طول موج ها و رنگ های مختلف اصلاح کرد. این نتایج منجر به کمیتی به نام شار فوتون کارا (YPF) می شود. YPF در واقع یک شاخص اندازه گیری شدت نور است که براساس میزان سودمندی طول موج های نور با در نظر گرفتن اینکه تنها رنگ نور و طول موج داده شده به گیاه باشد، وزن دهی می شود.

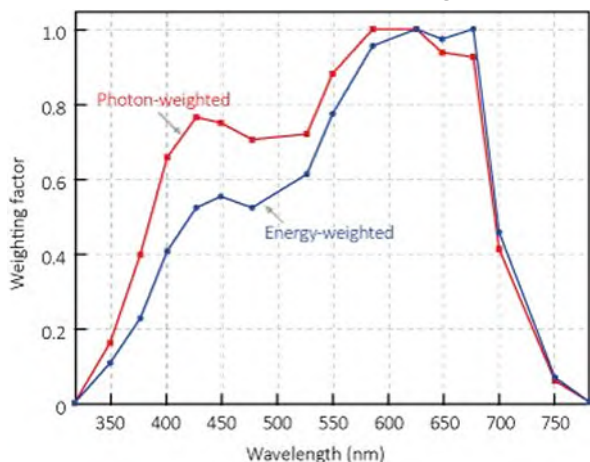
توضیح بیشتری برای درک این موضوع ارائه می دهیم. مسلماً اندازه گیری PPFD شبیه به اندازه گیری $\frac{\text{توان}}{\text{شارتابشی}}$ است و در آن فقط مجموع کل PAR در نظر گرفته می شود و اثر طول موج های داده شده در نظر گرفته نمی شود. اما در حالت ایده آل، PPFD باید باتوجه به اثرگذاری طول موج های مجزا در تحریک عمل فتوسنتز، وزن دهی شوند. در واقع این مفهوم اصل و قاعده دقیقی است که در YPF یا بازده کوانتومی در نظر گرفته شده است. این معیار اندازه گیری PPFD که با وزن دهی به پاسخ فتوسنتزی گیاهان به فوتون های با طول موج های مختلف، براساس اثربخشی گیاهان در جذب آن فوتون انجام می گیرد، ما را یک گام در اندازه گیری شاخص های اندازه گیری نور برای رشد گیاهان به جلو می برد. بنابراین محاسبه YPF شبیه محاسبه شار نوری بصورتی است که به طیف نور مرئی براساس حساسیت چشم انسان وزن دهی می کند.

وزن دهی به کار گرفته شده توسط معیار اندازه گیری YPF برخی از کاستی های مربوط به اندازه گیری های PAR را از بین می برد. بعنوان مثال ۱۰۰ فوتون نور سبز خالص دارای مقدار PAR برابر با ۱۰۰ فوتون نور قرمز است ولی بیشتر فوتون های سبز توسط گیاه منعکس می شوند در حالیکه بیشتر فوتون های قرمز جذب گیاه می شوند. YPF به همین دلیل اندازه گیری بهتری انجام داده و می گوید ۱۰۰ فوتون نور سبز، YPF کمتری نسبت به ۱۰۰ فوتون نور قرمز دارد.

این ایده اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط دکتر مک کری مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسید که گیاهان، نور سبز نسبتاً کمتری نسبت به سایر طول موج ها جذب می کنند و در نتیجه عمل فتوسنتز عمدتاً توسط نور آبی و قرمز صورت می گیرد. با این حال، این نتیجه گیری یک نتیجه دقیق و کامل نیست. باتوجه به تجزیه و تحلیل های صورت گرفته توسط مک کری در رابطه با جذب نور تک برگ ها، YPF نمی تواند پاسخ فتوسنتزی همه گیاهان را نشان دهد. مطالعات اخیر هم نشان می دهد که نور سبزی که از برگ های بالایی گیاهان عبور می کند، اغلب توسط برگ های سایه دار تحتانی جذب می شوند. بنابراین YPF جذب نور سبز را مورد توجه قرار نداده و اهمیت آن را در تحریک عمل فتوسنتز در نظر نمی گیرد. براین اساس PPFD احتمالاً معیار بهتری برای پاسخ فتوسنتزی همه گیاهان می باشد (در ادامه ایرادات معیار YPF را بیان می کنیم).



شکل ۱۹- منحنی مک کری (McCree Curve) - پاسخ فتوسنتزی میانگین گیاهان به طول موج های مختلف



منحنی قرمز در نمودار زیر نشان می دهد که فوتون های حدود ۶۱۰ نانومتر (قرمز -نارنجی) بیشترین میزان فتوسنتز را در هر فوتون دارند. با این حال، از آنجایی که فوتون های با طول موج کوتاه انرژی بیشتری را به ازای هر فوتون حمل می کنند، لذا حداکثر مقدار فتوسنتز در هر واحد انرژی در طول موج بلندتر، حدود ۶۶۰ نانومتر، صورت می گیرد، چیزی که Deep Red نیز نامیده می شود.

منحنی YPF که در زیر نشان داده شده است از اندازه گیری های کوتاه مدت صورت گرفته بر روی تک برگ ها در نور کم بدست آمده است.

شکل ۲۰- منحنی وزن دهی فوتون ها براساس پاسخ دهی گیاهان به طول موج های مختلف برای عمل فتوسنتز

نقاط ضعف شاخص YPF

برخی از مطالعات طولانی مدت با در نظر گرفتن کل سطح گیاه که در نور بیشتر صورت گرفته است، نشان می دهد که کیفیت نور تأثیر کمتری بر سرعت رشد گیاه نسبت به مقدار نور (کمیت نور) دارد. البته این موضوع بستگی بسیار زیادی به محصول و نیز به سیستم چراغ و نورپردازی پروژه دارد.

علاوه بر کاستی های گفته شده، مسائل دیگری نیز در رابطه با YPF وجود دارد. یکی دیگر از مشکلات اصلی YPF این است که گونه های مختلف گیاهی بطور متفاوتی از نور استفاده می کنند. بنابراین بعید است پاسخ فتوسنتزی گونه های گیاهی که توسط مک کری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته بود بطور دقیق برای تمام ۳۵۲ هزار گونه گیاهی صادق باشد. اما این نظریه بصورت گونه خاص درست است، چون گیاهانی که مک کری مورد بررسی قرار داده بود همگی گونه های محصولات زراعی یا گونه های گیاهان کشاورزی بودند.

همچنین مطالب مک کری شامل اندازه گیری های کوتاه مدت بود که ممکن است نتایج او را تحت تاثیر و انحراف قرار داده باشد. مطالعات جدیدتر دیدگاه متفاوت تری را بیان می کنند. این مطالعات بلند مدت نشان می دهند که کمیت نور (مقدار نور) برای رشد گیاه مهمتر از کیفیت آن است. اگر چه مطالعات مک کری کمک بزرگی به درک ما از فتوسنتز و فیزیولوژی گیاه بود (به ویژه زمانی که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ منتشر شد)، هم نتایج مطالعات و هم تفاسیر بعدی ناشی از آن مطالعات نسبتاً ناقص و قدیمی هستند.

YPF همچنین نمی تواند سایر نقاط ضعف PPF و PPFD راه حلی ارائه دهد، زیرا مقادیر اندازه گیری شده می تواند دستکاری شده و یا در آنها اغراق صورت گیرد. براین اساس، فاصله ای که در آن اندازه گیری های مربوطه صورت می گیرد، PPFD میانگین و یا نسبت Min/Max به منظور ارزیابی دقیق و مقایسه سیستم های مختلف، مورد نیاز است. بنابراین حتی با اینکه مفهوم YPF یک راه حل ایده آل برای اندازه گیری کیفیت نور است، درک فعلی ما از عمل فتوسنتز و تفاوت فتوسنتز بین گونه های مختلف کافی نیست.

YPF این واقعیت را در نظر نمی گیرد که گیاهان از طول موج های مختلف نور برای شروع واکنش های مراحل مختلف بیوشیمیایی استفاده می کند و نیز توجهی به اینکه طیف های مختلف نور برای رشد گیاهان به منظور رسیدن به ماکزیمم پتانسیل آن گیاه نیاز است، توجه نمی کند. نور تماماً قرمز دارای ضریب امتیاز YPF بیشتری نسبت به نور با طیف وسیع تر که شامل همه طول موج های نور که گیاهان برای فتومورفوژن نیاز دارد، است (فتومورفوژن ایجاد متابولیت های ثانویه مانند رنگدانه، فلاونوئیدها، THC و CBD است).

مانند PAR، YPF نیز در یک نقطه اندازه گیری می شود که نشان نمی دهد گیاهان در زیر یک منبع نوری مصنوعی چقدر خوب می تواند رشد کند، اگر نور توسط عدسی های ثانویه بصورت یک پرتو باریک متمرکز شوند، ضریب امتیاز YPF در مرکز افزایش پیدا می کند. قانون مربع معکوس نور به این معنی است که مقدار YPF با مجذور فاصله از منبع نوری کاهش می یابد یعنی اگر اندازه ی YPF در فاصله ی ۱ اینچی از فیکسچر چراغ برابر ۱۰۰ باشد، در فاصله ی ۲ اینچی ۲۵ و در فاصله ۳ اینچی ۱۱/۱ خواهد بود. همانند PAR اگر اندازه گیری در نزدیکی و مستقیماً زیر منبع نوری انجام شود، می توان به راحتی ادعای داشتن YPF بالا را برای یک چراغ داشت. YPF نسبت به PAR اندازه گیری بهتری برای فهمیدن اینکه نور چقدر برای گیاه مفید است، انجام می دهد، اما این شاخص هم همچنان بیشتر کاستی های PAR را دارد. نشانگر لیزری قرمز درجه امتیاز YPF فوق العاده بالایی دارد اما نمی توان از آن برای رشد گیاه استفاده کرد.

نورپردازی مکمل برای گیاهان در گلخانه ها

با وجود نورپردازی مکمل برای رشد گیاهان در گلخانه ها هنوز بخش زیادی از نور روزانه گیاهان، از خورشید دریافت می شود. با این حال به این دلیل بر ایجاد نور اضافی مثل ایجاد نور قرمز و آبی بیشتر، تمرکز می کنیم چون مستقیماً منجر به تولید کلروفیل می شود.



شکل ۲۱- نور بنفش رنگ که در اکثر گلخانه های مجهز به نور مصنوعی دیده می شود.

امروزه تمایل به اضافه کردن LED های سفید اضافی بر روی چراغ های رشد گیاهان وجود دارد تا روشنایی محل پروژه ای که دارای چراغ های رشد گیاه می باشد، برای انسان خنثی تر شود. به دلیل استفاده از نورهای قرمز و آبی در چراغ های رشد گیاه موجود در پروژه های طراحی شده در سال های قبل، رنگ نور بنفش بصورت رنگ نور غالب در محیط پروژه ها مشاهده می شود.

رابطه بین انرژی و نور

رابطه بین نور و انرژی ایی که می تواند حمل کند در قانون پلانک توضیح داده شده است. طبق قانون پلانک $E = h\nu$ است یعنی ثابت پلانک ضرب در فرکانس فوتون برابر است با انرژی فوتون و چون در رابطه با نور، سرعت حرکت آن برابر C است و فرکانس و طول موج عکس هم هستند، در نتیجه $\nu = \frac{C}{\lambda}$ پس :

$$E = \frac{h \cdot C}{\lambda}$$

همانطورکه از معاله بالا می توان فهمید یک فوتون نور با طول موج کمتر انرژی بیشتری دارد یعنی یک فوتون نور آبی با طول موج ۴۵۰ نانومتر انرژی بیشتری نسبت به یک فوتون نور قرمز با طول موج ۶۶۰ نانومتر دارد. در ادامه ثابت خواهیم کرد چگونه این قانون به ما توضیح می دهد که با وجود تعداد فوتون های انرژی یکسان، طیف قرمز تأثیر بیشتری بر فتوسنتز گیاهان نسبت به مثلاً طیف یک فوتون آبی دارند.

$$E_{1\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{2 \times 10^{-25}}{\lambda} \left[\frac{J \cdot m}{\lambda} \right] \quad \text{با جاگذاری مقادیر ثابت پلانک و سرعت نور انرژی یک فوتون با طول موج } \lambda \text{ برابر است با :}$$

از طرف دیگر هر μmol نوری که در هر ثانیه بر سطح تابیده می شود دارای حدود 6×10^{17} فوتون است، یعنی

$$1 \left[\frac{\mu\text{mol}}{m^2 \cdot s} \right] = 6 \times 10^{17} [\text{Photons}]$$

$$E_{1\mu\text{mol}} \approx 6 \times 10^{17} \times \frac{2 \times 10^{-25}}{\lambda} = \frac{12 \times 10^{-8}}{\lambda} \left[\frac{J \cdot m}{m} \right] \quad \text{پس با توجه به دو مقدار فوق انرژی یک میکرومول نور برابر است با :}$$

یا به عبارت ساده تر به صورت یک قاعده کلی، انرژی یک μmol نور با طول موج λ برحسب ژول برابر است با $E_{1\mu\text{mol}} = \frac{120 \times 10^{-9}}{\lambda} [J]$ که در آن $\lambda =$ طول موج فوتون بر حسب نانومتر است.

از این رابطه اخیر متوجه می شویم به ازای $1 \mu mol$ ، انرژی برابر $\frac{120 \times 10^{-9}}{\lambda}$ ژول به گیاه می رسد، اگر بخواهیم ببینیم به ازای ۱ واحد انرژی چند μmol به روی گیاه می رسد آنگاه $[\frac{\mu mol}{J}] = \frac{\lambda}{120 \times 10^{-9}}$. با توجه به این رابطه بین طول موج نور و انرژی، می توان نتیجه گرفت فوتون های قرمز در پهنای باند ۶۶۰ نانومتری می توانند μmol بسیار بیشتری نسبت به طول موج های بلندتر مانند طول موج آبی ۴۵۰ نانومتری حمل کنند هرچند طول موج های بلندتر انرژی کمتری حمل می کنند.

حداکثر انتقال μmol نور قرمز ۶۶۰ نانومتری deep red برابر است با: $[\frac{\mu mol}{J}] \approx 5.5 \frac{660 nm}{120 \times 10^{-9}}$

حداکثر انتقال μmol نور آبی ۴۵۰ نانومتری برابر است با: $[\frac{\mu mol}{J}] \approx 3.75 \frac{450 nm}{120}$

البته مقادیر فوق نرخ ماکزیمم مطلق هستند.

در حال حاضر بالاترین بهره وری (efficacy) به دست آمده در یک پکیج از LED با طول موج ۶۶۰ نانومتری حدود $4.2 \frac{\mu mol}{J}$ است که مربوط به سری Osram Oslon Square V4 – Q1 2020 می باشد.

بالاترین بهره وری مصرف انرژی (efficiency) چراغ های LED رشد گیاه، امروزه بهره وری در حدود $3.5 \frac{\mu mol}{J}$ تولید می کنند. با این حال این مطلب نشان دهنده این است که در آینده می توان انتظار پیشرفت های بیشتری در موضوع efficacy را داشت.

نور قرمز برای فتوسنتز کارآمدتر از نور آبی است. این به این دلیل است که کلروفیل، رنگدانه ای که انرژی نور را برای فتوسنتز جذب می کند، نور قرمز را موثرتر از نور آبی جذب می کند. علاوه بر این، نور قرمز می تواند عمیق تر از نور آبی به درون برگ ها نفوذ کند، به این معنی که انرژی نور بیشتری را می توان توسط کلروپلاست ها جذب کرد. به همین دلیل است که گیاهانی که در شرایط سایه رشد می کنند اغلب دارای برگ های سبز عمیق تری هستند که به آنها اجازه می دهد تا نور قرمز بیشتری را که در دسترس است جذب کنند. در اینجا جدولی است که اثربخشی نسبی طول موج های مختلف نور برای فتوسنتز را خلاصه می کند:

طول موج (nm)	کارایی
۷۰۰	بالاترین
۶۵۰	بالا
۶۰۰	متوسط
۵۵۰	متوسط
۵۰۰	کم

همانطور که می بینید، نور قرمز (طول موج های ۶۸۰-۷۲۰ نانومتر) کارآمدترین طول موج برای فتوسنتز است. دلیل کارآمدی نور قرمز این است که بیشترین انرژی را در بین طول موج های مرئی نور دارد. این بدان معنی است که می تواند به راحتی توسط کلروفیل جذب شود و انرژی بیشتری برای فتوسنتز تولید کند. نور قرمز علاوه بر کارایی بالا، چندین مزیت دیگر نیز برای فتوسنتز دارد. به عنوان مثال، می تواند به افزایش سرعت انبساط برگ و تولید کربوهیدرات کمک کند. همچنین می تواند به بهبود مقاومت گیاهان در برابر استرس کمک کند. به طور کلی، نور قرمز مفیدترین طول موج نور برای فتوسنتز است. گیاهانی که نور قرمز کافی دریافت می کنند سریع تر، سالم تر و پربارتر رشد می کنند.

انتگرال نور روزانه (DLI)

انتگرال نور روزانه (DLI) که مخفف عبارت Daily Light Integral می باشد، مقدار کل نوری را که هر روز به یک گیاه می رسد را اندازه گیری می کند. DLI یک اندازه گیری تجمعی از تعداد کل فوتون هایی است که در طول دوره ی نوری (photoperiod) روزانه به گیاهان و جلبک ها می رسند. DLI تعداد «مول های» فوتون های مربوط به زون PAR را در هر متر مربع در یک روز اندازه گیری می کند و به صورت $\frac{mol}{d.m^2}$ بیان می شود. DLI روش خوبی برای پیاده سازی استراتژی نور در پرورش گلخانه ای با نورپردازی مکمل است. منظور از نورپردازی مکمل، نورپردازی با چراغ های مصنوعی علاوه بر نور خورشید می باشد. برای اکثر محصولات زراعی می توان مقدار ایده آل مجموع نوری را که در روز گیاهان می توانند از آن به طور مؤثر استفاده کنند، تعریف کرد.

مجموع کل نور برابر است با= کل نور دریافت شده از خورشید + مجموع نور مصنوعی در یک روز.



البته تجهیزات هوشنایی شما اطلاعات زیادی در مورد مقدار مول در هر روز به شما ارائه نمی دهند. بنابراین شما باید مقادیر بدست آمده از سولارمتر را که بصورت J/cm^2 می باشند، را به مول برگردانید تا مجموع کل در هر روز را بدست آورید. به خاطر داشته باشید که سولارمتر روی پشت بام است، بنابراین شما باید از این مقدار، مقداری را با توجه به ضریب انتقال شیشه ی گلخانه کم کنید.

شکل ۲۲- یک سولارمتر که برای اندازه گیری انرژی خورشیدی یا تابش خورشیدی بکار می رود.

DLI بر حسب مول فوتون در هر متر مربع در روز ($mol/m^2/d$) اندازه گیری می شود، که تاحدودی شبیه اندازه گیری تعداد فوتون های نوری است که هر روز به یک متر مربع از فضا برخورد می کنند. DLI برای گیاهان مهم است زیرا سرعت فتوسنتز را تعیین می کند، که فرآیندی است که طی آن انرژی نور را به انرژی شیمیایی به شکل قند تبدیل می کند. هر چه گیاهان نور بیشتری دریافت کنند، سریعتر می توانند فتوسنتز و رشد کنند. نیازهای DLI گیاهان مختلف بسته به نوع گیاه و مرحله رشد آن متفاوت است. به عنوان مثال، کاهو برای رشد سالم به DLI حدود $10 mol/m^2/d$ نیاز دارد، در حالی که گوجه فرنگی به DLI حدود $30 mol/m^2/d$ نیاز دارد.

سوال این است که چگونه می توان DLI را تنظیم کرد: با تغییر مدت زمانی که گیاهان شما نور دریافت می کنند (ساعت نورپردازی)، تغییر شدت نور روی کونوپی و نحوه استفاده از نور تکمیلی می توان به DLI مورد نظر رسید.

DLI تنها عاملی نیست که بر رشد گیاه تأثیر می گذارد. عوامل دیگری مانند دما، مواد مغذی و رطوبت نیز نقش دارند. نور زیاد می تواند به اندازه نور کم برای گیاهان مضر باشد. قرار گرفتن بیش از حد در معرض نور می تواند باعث استرس و رشد گیاهان شود.

- مبدل، دیتای گرفته شده از سولارمتر به مجموع نور روزانه (DLI) گرفته شده از خورشید بصورت زیر است که J/cm^2 را به $mol/d.m^2$ تبدیل می کند:

$$\text{مجموع نور گرفته شده (DLI) از خورشید} = \frac{\text{مقدار بدست آمده از سولارمتر } J/cm^2}{100} \times 2.15 \times \% \text{ گلخانه}$$

پس یکی دیگر از فاکتورهای مهم تعداد ساعت نورپردازی مصنوعی گیاهان است که توجه به آن بسیار اهمیت دارد.

- همانطور که دیدید نور مکملی که گیاهان از چراغ های رشد گیاه دریافت می کنند نیز قابل محاسبه است. بنابراین سطح نور PPFD را با توجه به تعداد ساعات روشنایی ایم چراغ ها به DLI تبدیل می کنید. برای تبدیل PPFD به DLI ($\mu mol/s.m^2$ به $mol/d.m^2$) داریم:

$$\text{مجموع نور گرفته شده (DLI) از چراغ های رشد گیاه} = \frac{PPFD \times 3600 \times \text{تعداد ساعت}}{1.000.000}$$

بهره وری فوتونی

بهره وری فوتون (Efficacy) به میزان بهره وری یک سیستم نورپردازی مخصوص باغبانی در تبدیل انرژی الکتریکی به فوتون های PAR اشاره دارد که منبع با عبارت "بهره وری فوتونی" به آن اشاره می کنیم.

با داشتن PPF و میزان توان (وات) ورودی چراغ می توانید بهره وری انرژی (efficiency) را محاسبه کنید که برحسب $\frac{\mu mol}{J}$ بیان می شود. هر چه این عدد بزرگتر باشد، یک سیستم نورپردازی باغبانی در تبدیل انرژی الکتریکی به فوتون های PAR کارآمدتر خواهد بود. اما به یاد داشته باشید که مقدار بهره وری فوتون چیزی در مورد اثربخشی نور بر محصولات ارائه نمی دهد و همچنین طول موج های نور بالای ۷۰۰ نانومتر را به حساب نمی آورد.

جمع بندی

به منظور سرمایه گذاری در سیستم نورپردازی مناسب کشاورزی و باغبانی، برای رسیدن به اهداف کشت، باید PPF، PPFD و بهره وری فوتونی چراغ را بدانید تا تصمیمات آگاهانه ای برای خرید و طراحی داشته باشید. با این حال، این سه معیار نباید به عنوان تنها متغیرهای دخیل در تصمیم گیری و طراحی سیستم در نظر گرفته شوند، چندین متغیر و شاخص دیگر مانند form factor و ضریب utilization (CU) نیز وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. زاویه پخش نور و فاصله نصب چراغ نیز باتوجه به علم نور و کشاورزی توسط متخصصان محاسبه می شوند. کیفیت چیپ های LED استفاده شده در چراغ و نحوه طراحی الکتریکال ماژول منبع نوری مهمترین فاکتور در دستیابی به بهره وری بالا می باشد. مطالعه دیتاشیت چراغ می تواند اطلاعات خوبی جهت مقایسه مطلوب ارائه بدهد.

شاخص	واحد اندازه گیری	تعریف
PPF	$\frac{\mu mol}{s}$	کل مقدار نوری است که در زون PAR قرار دارد و توسط یک منبع نوری در هر ثانیه تولید می شود
PPFD	$\frac{\mu mol}{s.m^2}$	میزان نوری که در زون PAR است و به کونوپی محصول می رسد، تعداد فوتون های فعال فتوسنتزی است که در هر ثانیه روی سطح گیاه می افتند.
EFFICACY	$\frac{\mu mol}{J}$	میزان بهره وری یک سیستم نورپردازی مخصوص باغبانی در تبدیل انرژی الکتریکی به فوتون های PAR
DLI	$\frac{mol}{d.m^2}$	مقدار کل نوری را که هر روز به یک گیاه می رسد، اندازه گیری می کند.

جدول ۱- شاخص های مهم سیستم های نورپردازی مخصوص رشد گیاه

تعداد ساعات بهینه نورپردازی، منحنی پخش نور و زاویه پخش نور نیز فاکتورهای مهم حوزه نورپردازی مخصوص گیاهان می باشد.

با توجه به تعاریف این مقاله، در جدول زیر شاخص های مرتبط با نور قابل درک برای انسان و گیاه را مشاهده می کنید.

حساسیت گیاهان	فتوسنتز گیاهان	انسان	حساسیت (Sensitivity)
منحنی حساسیت همه گیاهان 280-800 nm	تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) 400-700 nm	منحنی حساسیت چشم 360-830 nm	شار (intensity)
شار فوتونی (PF) $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{s}}\right]$	شار فوتونی فتوسنتزی (PPF) $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{s}}\right]$	شار نوری $[\text{lm}]$	چگالی شار (density)
چگالی شار فوتون (PFD) $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right]$	چگالی شار فوتون فتوسنتزی (PPFD) $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}\right]$	شدت روشنایی، لوکس $\left[\text{lux} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}\right]$	بهره وری (efficacy)
بهره وری فوتون $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{J}}\right]$	بهره وری فوتون فتوسنتزی $\left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{J}}\right]$	بهره نوری $\left[\frac{\text{lm}}{\text{W}}\right]$	مشخصات رنگ نور
انتگرال نور روزانه (DLI) $\left[\frac{\text{mol}}{\text{d} \cdot \text{m}^2}\right]$	انتگرال نور روزانه (DLI) $\left[\frac{\text{mol}}{\text{d} \cdot \text{m}^2}\right]$	CRI, CCT, xy	میزان نور روزانه

جدول ۲- شاخص های مهم نور قابل درک برای انسان و گیاه

در ادامه :

همانطور که مشاهده کردید علاوه بر شاخص های گفته شده، فاکتورهای دیگری نیز در نورپردازی مخصوص رشد گیاهان موثر هستند. در بخش دوم به سایر شاخص های مهم نور در صنعت کشاورزی و رشد گیاهان خواهیم پرداخت که منحنی پخش نور برحسب طول موج یکی از مهمترین آنها می باشد. با توجه به محل کشت، نوع کشت و محصول زراعی خود با مراجعه به دیتاشیت فنی چراغ ها، طیف پخش نوری مناسب کاربری خود را تهیه نمایید. همواره درمورد کیفیت محصول تولیدکنندگانی که دیتاشیتی برای چراغ گلخانه ای خود ارائه نمی دهند تردید داشته باشید.

اگر می خواهید به سایر مطالب در این زمینه دسترسی داشته باشید، به لینک زیر مراجعه کنید:

https://www.sayanelectric.ir/sayan_academy_articles/

منابع:

-<https://www.horti-growlight.com/en-gb/par-ppf-ypf-ppfd-dli>

-<https://chilledgrowlights.com/education/understanding-led-grow-light-specs>

-<https://www.blackdogled.com/blogs/education/what-is-yield-photon-flux-ypf-and-is-it-good-for-comparing-grow-lights>

-<https://www.upowertek.com/improving-photon-efficacy-par-ppf-and-ppfd-for-horticultural-and-grow-lights/>

✓ نظرات شما، کلید راهنمای ماست، با همکاری شما، ما در راستای بهتر شدن این مقاله قدم برمی داریم. منتظر بازخوردهای شما هستیم.