نوردهی مصنوعی با هدف کنترل رشد گیاه، فتومورفوژنز و تولید متابولیت‌های ثانویه

حسن ساری‌خانی
گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

خلاصه

ویژگی‌های نور شامل کمیت نور (شدت و مدت زمان نوردهی) و کیفیت (ترکیب طیفی) از عوامل مهم موثر بر رشد و فیزیولوژی گیاهان می‌باشند. نور علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز برای فتوسنتز، نقش سیگنالینگ بسیار مهمی در فرآیندهای بسیار مهم گیاه شامل رشد و فتومورفوژنز دارد. اگرچه در بسیاری از مناطق کشور مشکل نور زیادی وجود دارد و مشکلاتی را در پرورش گیاهان ایجاد می‌کند اما با توجه به شرایط مختلف پرورش گیاهان از جمله اتاقک رشد، فیتوترون، کارخانه گیاهی و گلخانه نوردهی مصنوعی برای افزایش کیفیت و کمیت تولید امری اجتناب ناپذیر است. تکنولوژی و دانش نوردهی مصنوعی گیاهان در سال‌های اخیر به طور چشمگیری افزایش یافته است. در این بین استفاده از طیف‌های تولید شده توسط دیودهای ساطع کننده نور (LED)، که مزایای متعددی مانند امکان تنظیم طیف و شدت نور در مقایسه با سایر منابع نوری معمولی ارائه می‌دهند، سبب افزایش استفاده از نوردهی مصنوعی در محیط‌های کنترل شده و همچنین در محیط‌های باز شده است. نوردهی مصنوعی با اهداف مختلف شامل نوردهی در محیط‌های کاملا کنترل شده، نوردهی به صورت تکمیلی، نوردهی برای افزایش طول روز و نوردهی برای تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاثیر طیف نور و نحوه اثر آن بر فتوسنتز، فرآیندهای فتوپریودی و همچنین مسیرهای تولید متابولیت‌های ثانویه از اهداف فیزیولوژیکی نوردهی مصنوعی است. این دانش را می‌توان در کشاورزی حفاظت شده و گلخانه‌ای به منظور افزایش کمیت و کیفیت محصول استفاده کرد. این مقاله به بررسی اجمالی تاثیر ویژگی‌های نوردهی مصنوعی بر رشد گیاه، فتومورفوژنز و تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهان باغبانی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: زمان نوردهی، شدت نور، کیفیت نور، گل انگیزی، منابع نور.

مقدمه

نور یکی از پارامترهای اصلی محیطی است که فیزیولوژی گیاه را در کل چرخه زندگی گیاه تنظیم می‌کند، زیرا گیاهان از نور به عنوان منبع انرژی برای تثبیت کربن در فتوسنتز و همچنین سیگنالی برای فعال سازی و تنظیم بسیاری از فرایندهای کلیدی دیگر مربوط به رشد و نمو گیاه استفاده می‌کنند (Higuchi and Hisamatsu, 2016). نور مورد نیاز گیاهان از لحاظ شدت، مدت تابش یا فتوپریود و همچنین از لحاظ کیفیت نور اهمیت زیادی دارد. نور خورشید دارای فوتون‌هایی با طول موج‌هایی مختلف است که شامل طیف‌های مختلفی از جمله امواج قرمز دور، مرئی و فرابنفش است. تنها بخشی از این طیف وسیع، که به نام نور مرئی نامیده می‌شود و دارای طول موجی بین ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر است در اکثر پدیده‌های گیاهی شرکت دارند (Taiz et al., 2015). گیرنده‌های نور می‌توانند انرژی نواحی مختلف طیف نور خورشید را دریافت کنند. از طریق این گیرنده‌های نوری، گیاهان می‌توانند کیفیت، مدت و جهت نور را درک کنند و تغییرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی را برای سازگار شدن با محیط القا کنند (Rajapakse and Shahak, 2007).

در طبیعت نور با شدت و مدت مختلفی به گیاهان می‌رسدکه این موضوع می‌تواند سبب تنش نوری گردد. تنش نوری به اثر مخربی اشاره دارد که قرار گرفتن در معرض سطح ناکافی یا بیش از حد نور می‌تواند بر عملکرد و رشد گیاه داشته باشد. در حالی که قرار گرفتن در معرض نور ناکافی فعالیت فتوسنتزی و برخی از مسیرهای سیگنالینگ را محدود می‌کند، قرار گرفتن در معرض انرژی اضافی نور می‌تواند علاوه بر آسیب به دستگاه فتوسنتزی، سبب به هم ریختن رشد و نمو گیاه شده و مشکلاتی مانند کاهش رشد گیاه، آفتاب سوختگی گیاه و سرشاخه و همچنین میوه را ایجاد نماید (Lichtenthaler, 1998). تصور بر این است که ما (کشور ایران) از لحاظ جغرافیایی در موقعیتی قرار داریم که نور کافی است یا شدت بالای نور وجود دارد. برهمین اساس نیز مشکلات شدت بالای نور به همراه گرما که سبب آفتاب سوختگی میوه و تنه گیاه می‌شود اهمیت زیادی دارد (احتشامی و همکاران، ۱۳۹۳). اما در کنار نور شدید در اغلب نواحی ایران، نبود نور کافی در ساختار تاج گیاه در کشت‌های فشرده یا سنتی (Jamshidian et al., 2010)، کاهش شدت نور در روزهای ابری،کاهش شدت نور در روزهای کوتاه در فصول پاییز و زمستان، کاهش شدت نور عبور یافته از ساختار گلخانه به دلیل اسکلت گلخانه

یا تیره شدن پوشش‌های گلخانه، سایه اندازی تجهیزات مورد استفاده در کشت‌های گلخانه‌ای (Castilla, 2012) و همچنین پرورش کامل گیاهان به وسیله نور مصنوعی مانند اتاقک رشد (موسوی فتاح و ساری‌خانی، ۱۳۹۵؛ Sarikhani and Sarikhani-khorami, 2021)، کارخانه‌های گیاهی و فیتوترون (Kozai and Niu, 2016) ضرورت نوردهی مصنوعی را برای پرورش و تولید مناسب گیاهان ضروری می‌نماید.

نوردهی در علوم گیاهی با استفاده از منابع مختلف نوری مانند افزایش استفاده از نور طبیعی، استفاده از لامپ‌های تنگستنی، متال هالید، سدیمی پر فشار، فلورسنت و دیودهای ساطع کننده نور یا ال‌ای‌دی انجام می‌شود (Rajapakse and Shahak, 2007). در گذشته به دلیل استفاده از منابع نور پرمصرف، نوردهی مصنوعی عملی پر هزینه بوده و به همین دلیل مورد استقبال تولید کنندگان قرار نگرفته است. اما استفاده از ال‌ای‌دی‌ها مزایای زیادی نسبت به انواع نوردهی‌های قبلی در باغبانی دارد. اندازه کوچک، راندمان بالا، قیمت کم، طول عمر بالا، عدم تولید گرما و قابلیت انتخاب طول موج‌های خاص از ویژگی‌های این نوع لامپ‌ها می‌باشد (Massa et al. 2008; Paradiso and Proietti, 2021). از طرف دیگر در سال‌های اخیر با توجه به افزایش دسترسی به منبع تولید نور ال‌ای‌دی و مزایای آن نسبت به سایر منابع نوری به نظر می‌رسد اعمال نوردهی مصنوعی توسط ال‌ای‌دی روشی موثر، اقتصادی و ارگانیک در کنترل رشد گیاه باشد. تکنولوژی ال‌ای‌دی ابزاری برای پرورش‌دهندگان فراهم می‌کند تا طیف مناسب را برای گونه‌های گیاهی خاص بکار ببرند و با ترکیب طول موج‌های مختلف و با ایجاد نسبت‌های جدید بین طول موج‌های نور می‌توان رشد و در نهایت عملکرد را تحت تأثیر قرار داد (Higuchi and Hisamatsu, 2016). به طور معمول، نوردهی مصنوعی در کشت و کار گیاهان گلخانه‌ای یا مزرعه‌ای به همراه نور طبیعی استفاده می‌شود و به صورت تکمیلی است. در نوردهی تکمیلی برای صرفه جویی در مصرف انرژی می‌توان از طیف‌های نوری موثر در فعالیت مورد نظر استفاده نمود و از هدر رفت انرژی جلوگیری نمود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵).

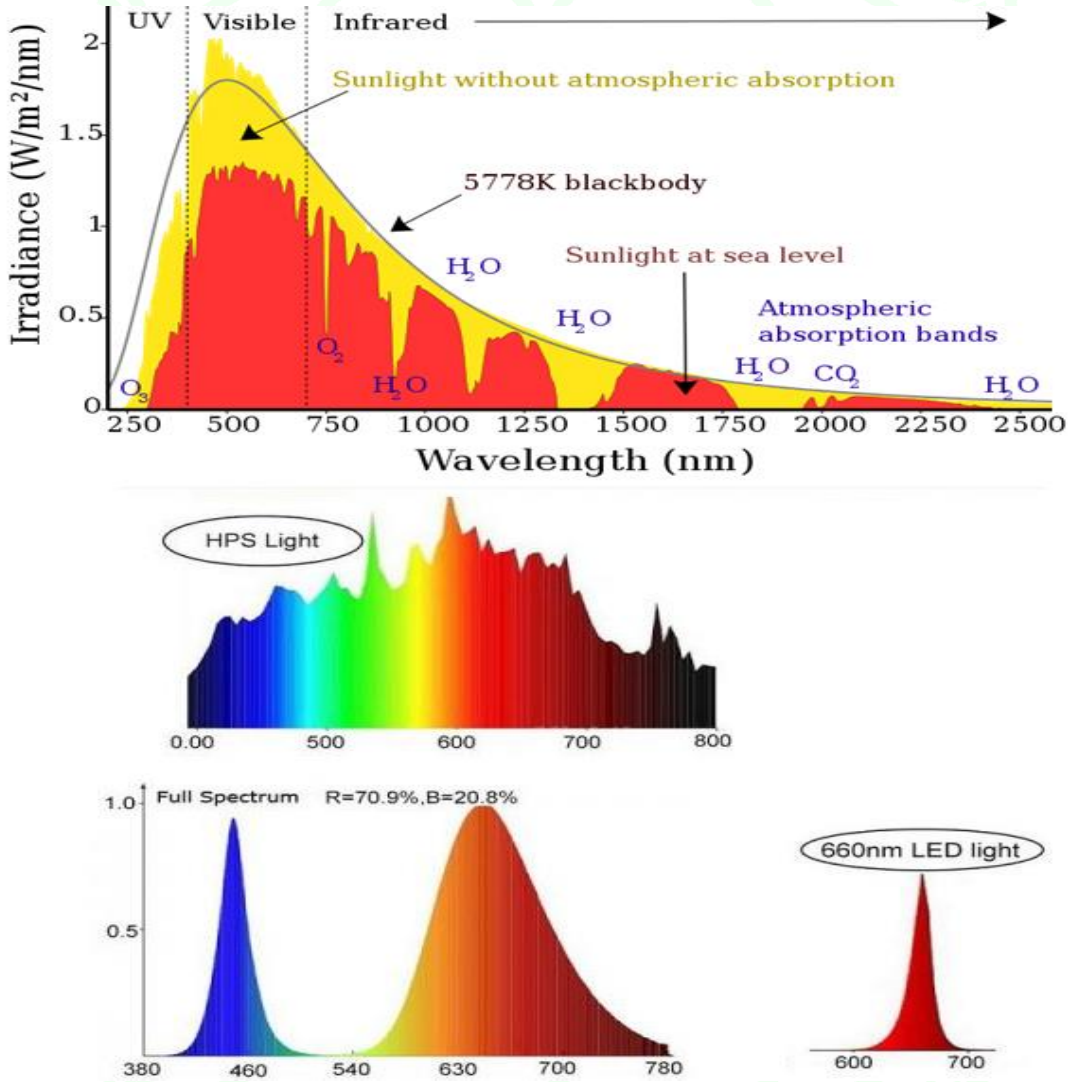
در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از شرکت‌های تولید کننده تجهیزات روشنایی با همکاری پژوهشگران علوم گیاهی، تجهیزات نوردهی براساس فناوری دیودهای ساطع کننده نور ویژه گیاهان با امکان کنترل دقیق طیف نور، شدت و مدت تابش تولید نموده‌اند که علاوه بر افزایش کارآیی، سبب کاهش هزینه‌های استفاده شده است. این موضوع سبب رونق استفاده از این بخش در تنظیم رشد گیاه و بهبود کمیت و کیفیت گیاهان تولیدی در بخش‌های مختلف علوم باغبانی شده است. مقاله حاضر مروری کوتاه بر پژوهش‌های اخیر نویسندگان در نوردهی مصنوعی گیاهان علوم باغبانی می‌باشد.

ویژگی‌های نور برای نوردهی مصنوعی

کیفیت نور

کیفیت نور به رنگ یا طول موج امواج رسیده به سطح گیاه گفته می‌شود. اگرچه طیف نور خورشید در سطح زمین بسیار وسیع است و از حدود ۲۰۰ تا حدود ۲۵۰۰ نانومتر را شامل می‌شود (شکل ۱) اما گیاهان به همه طیف‌های خورشیدی نیاز ندارند. محدوده قابل جذب و استفاده توسط گیاهان کمی بیش از طیف مرئی نور است و از فرابنفش (کمتر از ۴۰۰ نانومتر) تا بخش اندکی از قرمز دور (بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر) را شامل می‌شود (Rajapakse and Shahak, 2007). اگرچه بخش موثر در فتوسنتز یا تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR)، طیفی بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر را دارا می باشد، اما همه این طیف نیز در فتوسنتز به یک میزان اهمیت نداشته و گیاه بدون دریافت بخش‌هایی از آن می‌تواند به صورت مطلوبی رشد و نمو داشته باشد (Sarikhani and Sarikhani-khorami, 2021). کیفیت نور تاثیر زیادی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه در طول دوره رشد و نمو و به طور ویژه فتوسنتز دارد. کارآیی نور آبی و قرمز در فتوسنتز متفاوت است (پاکان و همکاران، ۱۳۹۷). در این میان مشخص شده است که نور قرمز برای فتوسنتز و تجمع نشاسته و نور آبی برای شکل‌گیری کلروفیل و نمو کلروپلاست، باز شدن روزنه و فوتومرفوژنز در گیاهان دارای اهمیت است. همچنین کیفیت نور همچنین روی ساختار آناتومیکی برگ‌های گیاه موثر است (Taiz et al., 2015; Paradiso and Proietti, 2021).

در نوردهی مصنوعی، انتخاب طیف مناسب نور متناسب با نیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشدی اهمیت زیادی دارد و از اتلاف انرژی کم می‌کند. با گسترش تکنولوژی دیودهای ساطع کننده نور، امکان نوردهی با طیف‌های باریک نور به صورت تنها یا ترکیب آنها و ایجاد فول اسپکتروم وجود دارد (شکل ۱). ترکیب‌های مختلفی از نورهای آبی و قرمز (از ۱۰۰ درصد آبی تا ۱۰۰ درصد قرمز) در پژوهش‌های مختلفی گیاهی به همراه یا بدون نور خورشید مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از ضرورت هر دو طیف آبی و قرمز برای رشد مطلوب و افزایش عملکرد دارد (آقاکریم، ۱۳۹۵). ترکیب حداقل ۱۶ و حداکثر ۳۰ درصدی نور آبی به همراه نور قرمز هم در فضاهای کاملا کنترل شده مانند اتاقک رشد، کارخانه گیاهی و همچنین در گلخانه به عنوان ترکیب مناسبی برای نوردهی مصنوعی می‌باشد (موسوی فتاح و ساری‌خانی، ۱۳۹۵؛ پاکان و همکاران، ۱۳۹۷؛ Paradiso and Proietti, 2021).



شکل ۱- مقایسه طیف تابش خورشیدی، لامپ فورسنت، دیودهای ساطع کننده نور قرمز و دیودهای ساطع کننده فول اسپکتروم. بالا) نمودار طیف تابش نور مستقیم را در بالای جو زمین (زرد) و در سطح دریا (قرمز) نشان می‌دهد. اگرچه طیف تابش خورشیدی بسیار وسیع می‌باشد اما بخش اندکی از طیف خورشیدی شامل بخشی از فرابنفش، بخش‌هایی از نور مرئی و بخش اندکی از قرمز دور توسط گیاهان جذب می‌شود. وسط) طیف نور حاصل از لامپ سدیمی پر فشار را نشان می‌دهد که بسیاری از طیف‌های غیر ضروری برای گیاهان را نیز تولید می‌کند. پایین سمت راست) طیف تولید شده توسط دیود ساطع کننده نور قرمز را نشان می‌دهد که طیف باریکی از نور قرمز را تولید می‌کند. پایین سمت چپ) طیف تولید شده توسط دیودهای ساطع کننده نور فول اسپکتروم را نشان می‌دهد که طیف ترکیبی از نورهای منتخب متناسب با نیاز گیاه را تولید می‌کند.

اگرچه در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در محیط کنترل شده، از طیف‌های قرمز دور و فرابنفش برای القای رشد و افزایش زیست توده استفاده نشده است، اما گیرنده‌های نوری این بخش‌ها را نیز جذب نموده و نسبت به آن واکنش نشان‌می‌دهند. نسبت نور قرمز به قرمز دور از طریق تغییر در تعادل بین فیتوکروم‌های فاررد و رد، در فرآیندهای گل انگیزی گیاهان وابسته به طول روز و همچنین فرآیندهایی مانند اجتناب از سایه موثر است. در این راستا نوردهی نور قرمز دور با طول موج ۷۳۵ نانومتر، در گیاه روز کوتاه توت فرنگی سبب القای گل انگیزی در شرایط روز بلند شده است (Zahedi and Sarikhani, 2016 and 2017). همچنین نسبت قرمز به قرمز دور نیز می‌توان روی مورفولوژی گیاه موثر باشد که در کشت‌های گلخانه‌ای و به ویژه در کشت‌های فشرده دارای اهمیت است. نسبت کم این رابطه، سبب کشیده شدن گیاه می‌شود. در طبیعت، هنگامی که گیاهان توسط گیاهان همسایه سایه انداخته می‌شوند، این پدیده را مشاهده می‌کنیم (Taiz et al., 2015). در شرایط کشت گلخانه‌ای سایه اندازی توسط اسکلت گلخانه و سایر موارد و همچنین کشت فشرده گیاهان و سایه اندازی آنها روی یکدیگر می‌تواند به مشکل تبدیل شود. با توجه به اینکه نوردهی طیف قرمز دور معمول نیست، نوردهی با طیف‌های قرمز و افزایش میزان آن می‌تواند در تغییر این تعادل مورد استفاده قرار گیرد.

پرتو فرابنفش یکی از مهمترین بخش‌های نور خورشید است که حدود ۶ درصد از مجموع فوتون‌های خورشیدی را شامل می‌شود. این پرتو براساس طول موج به سه دستهA (۳۲۰ تا ۴۰۰ نانومتر)، B (۲۸۰ تا ۳۲۰ نانومتر) و C (کمتر از ۲۸۰ نانومتر) تقسیم بندی می‌شود که با افزایش طول موج پرتوهای فرابنفش از انرژی آنها کاشته می‌شود. پرتوهای فرابنفش به دلیل داشتن انرژی بالا برای شکستن باندهای شیمیایی و همچنین تنش‌زا بودن در بسیاری از موارد سبب کاهش رشد گیاهان می‌شوند. در بین گیاهان بررسی شده، حدود ۵۰ درصد گیاهان حساس، ۲۰ تا ۳۰ درصد با حساسیت متوسط و مابقی غیر حساس به نور فرابنفش B شناخته شده‌اند. کاهش در رشد رویشی یکی از مهمترین علایم ظاهری تنش نور فرابنفش است. همچنین در گیاهان حساس کاهش سطح برگ یا رشد ساقه در مقابل نور فرابنفش مشاهده شده است (Hollosy, 2002). پرتو فرابنفش به عنوان نوعی تنش محسوب می‌گردد و زمانی که گیاهی در مقابل نور فرابنفش قرار می‌گیرند، بسته به نوع و انرژی پرتو فرابنفش، سبب فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی گیاه شده و در پی آن تولید متابولیت‌های ثانویه افزایش می‌یابد (ساری‌خانی، ۱۳۹۲؛ Hollosy, 2002). در این راستا در طبیعت برای افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه به ویژه در گیاهان دارویی، انتخاب مناطقی با شرایط تنش زا از جمله تابش فرابنفش در پرتو خورشیدی به عنوان یکی از راه‌های افزایش متابولیت‌های ثانویه در نظر گرفته می‌شود. در همین راستا نیز اعمال تیمارهای پرتو فرابنفش در حدی که سبب از بین رفتن گیاه نشده و آثار مخرب آن زیاد نباشد توضیه شده است. اگرچه پرتو فرابنفش C به دلیل انرژی بسیار بالا اثرات مخرب زیادی دارد و بیشتر با هدف ضد عفونی بکار می‌رود، استفاده از پرتو فرابنفش B در زمان بسیار محدود چند دقیقه در طول روز و تیمار پرتو فرابنفش A در زمان طولانی‌تر چند ساعت در طول روز به عنوان تیمارهای قابل اعمال و نتیجه بخش فرابنفش برای افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه نتیجه بخش بوده است (ساری‌خانی، ۱۳۹۲؛ شاهبداغلو و همکاران، ۱۳۹۵). در همین راستا، اگرچه بلوکه کردن پرتو فرابفش در گلخانه‌ها، مزیت کنترل آفات و بیماری‌ها را به دلیل کاهش جمعیت آفات خواهد داشت، اما به دلیل محدودیت عبور نور فرابنفش از پوشش‌های گلخانه‌ای (Castilla, 2012)، تولید برخی ترکیبات فیتوشیمیایی به ویژه متابولیت‌های ثانویه کاهش یافته و کاربرد این پرتو در شرایط کنترل شده در کشت‌های گلخانه‌ای امکان افزایش ارزش غذایی برخی گیاهان را فراهم می‌نماید.

شدت نوردهی

واحدهای مختلفی به طور مستقیم یا غیر مستقیم برای بیان شدت نور در علم فیزیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت بخش تشعشع فعال فتوسنتزی نور خورشید، واحد میکرومول بر متر مربع در ثانیه برای بیان لحظه‌ای شدت نور و واحد مول بر متر مربع در روز برای بیان شدت نور تجمعی (DLI) مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه نور لحظه‌ای و شدت آن اهمیت زیادی در فعال سازی واکنش‌های گیاهی دارد اما به دلیل نوسانات بسیار زیاد در شدت نور لحظه‌ای و همچنین اهمیت طول روز، بیان شدت نور به صورت تجمعی نیز در کشت‌های گلخانه‌ای، به ویژه هنگامی که از نوردهی مصنوعی برای تکمیل نور مورد نیاز استفاده می‌گردد، نیز دارای اهمیت زیادی است. در صورت ثابت بودن شدت نور لحظه‌ای، شدت نور تجمعی از حاصل ضرب فتوپریود در شدت لحظه‌ای نور بدست می‌آید (Akiyama and Kozai, 2016).

بخش PAR نور خورشید شدتی را بین ۱۰۰ تا نزدیک ۳۰۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه بسته به شرایط آب و هوایی و زاویه تابش در سطح زمین دارد. به طور معمول در شدت نور کم، گیاهان دچار تاریک رویی می‌شوند که در این حالت کلروفیل کمی تولید شده و رشد طولی زیاد خواهد شد. از طرف دیگر گیاهان برای فتو سنتز و تولید بهینه باید در شرایط اشباع نوری قرار گیرند. اگرچه امکان فراهم کردن شرایط بهینه نوری در تک تک برگ‌ها و همه قسمت‌های گیاهان فراهم نیست اما با انجام درست اصول تربیت گیاهان، انعکاس نور به درون تاج گیاه و همچنین نوردهی مصنوعی، امکان ایجاد شرایط بهینه فراهم می‌گردد. اگرچه تنوع بسیار زیادی در میزان نیاز نوری گیاهان مختلف وجود دارد اما شدت نور مورد نیاز گیاهان با توجه به نوع فعالیت نیز متفاوت است. برای مثال گیرنده نوری فیتوکروم‌ها که بیشتر در محدوده قرمز و قرمز دور جذب نوری دارند برای انجام واکنش‌های مختلف وابسته به نور به شدت‌های مختلفی از نور نیاز دارند. در این تقسیم بندی، این واکنش‌ها شامل ۱) واکنش‌هایی که در شدت نور کم (کمتر از ۰٫۰۵ میکرومول بر مترمربع)، ۲) واکنش‌هایی با شدت نور متوسط (۱ میکرومول بر متر مربع تا حداکثر ۱۰۰۰ میکرومول بر مترمربع) و ۳) واکنش‌های نیازمند به شدت نور بالاتر از ۱۰۰۰میکرومول بر متر مربع هستند (Taiz et al., 2015).

مدت نوردهی یا فتوپریود

بسیاری از گیاهان تغییرات تدریجی در طول روز (دوره نوری) را که مطمئن‌ترین نشانه فصلی در عرض‌های جغرافیایی بالا است را برای فرآیندهای مختلف از جمله زمان گل انگیزی حس می‌کنند. این پدیده، دوره نوری، شرایط محیطی را پیش بینی می کند و گیاهان را قادر می سازد تا بقا و تولید مثل خود را در زمان مناسب سال به حداکثر برسانند. در طبیعت فتوپریود ویژگی از نور را شامل می‌شود که براساس محل قرار گیری روی کره زمین و سازگاری گیاهان با شرایط محیط اطراف ایجاد شده است. در کشاورزی حفاظت شده، طبعیت از الگوهای طبیعی توجیه نداشته و تغییر این الگوها برای افزایش عملکرد و کیفیت در تولید محصولات کشاورزی ضروری است (Paradiso and Proietti, 2021). در شرایطی که هیچ نور طبیعی وجود ندارد مانند اتاقک رشد و کارخانه گیاهی، تامین تمامی نور با تمام ویژگی‌ها به صورت مصنوعی انجام می شود. به طور معمول در این شرایط برای افزایش رشد فتوپریود ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی یک فتوپرپود معمول برای افزایش رشد و بازده عملکردی می‌باشد. بااینحال انوع مختلفی از فتویودها حتی خارج از بازه زمانی ۲۴ ساعت نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Akiyama and Kozai, 2016). در شرایط گلخانه‌هایی که بخشی از نور به صورت طبیعی فراهم می گردد جبران طول روز با نوردهی مصنوعی صورت می‌گیرد و نوردهی مصنوعی در پایان روز یا گاهی اوقات در صبح زود قبل از طلوع آفتاب روشی برای تامین فتوپریود لازم است.

اهداف نوردهی مصنوعی

نوردهی مصنوعی به طور معمول با اهدافی مانند نوردهی در فضاهای کاملا کنترل شده مانند اتاقک رشد (موسوی فتاح و ساری‌خانی، ۱۳۹۵؛ Sarikhani and Sarikhani-khorami, 2021)، کارخانه گیاهی، فیتوترون (Higuchi and Hisamatsu, 2016)، نوردهی به همراه نور طبیعی برای افزایش شدت نور یا تغییر در کیفیت نور (ساری‌خانی، ۱۳۹۲)، نوردهی در پایان روز یا در طول شب برای افزایش مدت زمان نوردهی (Zahedi and Sarikhani, 2016 and 2017) انجام می‌شود. همچنین انواع نوردهی را می‌توان براساس اهداف فیزیولوژیکی افزایش فتوسنتز، افزایش یا تغییر در دوره‌های روشنایی و واکنش‌های فتوپریودی و همچنین تغییر در بیان ژن‌های مختلف کنترل کیفیت محصول و کنترل رشد و مورفولوژی گیاه تقسیم بندی نمود. کیفیت، شدت و مدت نوردهی و همچنین شرایط نوردهی بسته به اهداف مختلف ذکر شده متفاوت می‌باشد (ساری‌خانی، ۱۳۹۲؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Zahedi and Sarikhani, 2016 and 2017). برای مثال مقایسه‌ای بین نوردهی با اهداف افزایش فتوسنتز و القای واکنش‌های فتوپریودی در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- مقایسه شرایط نوردهی با هدف افزایش فتوسنتز و تاثیر بر فرآیندهای وابسته به فتوپریود

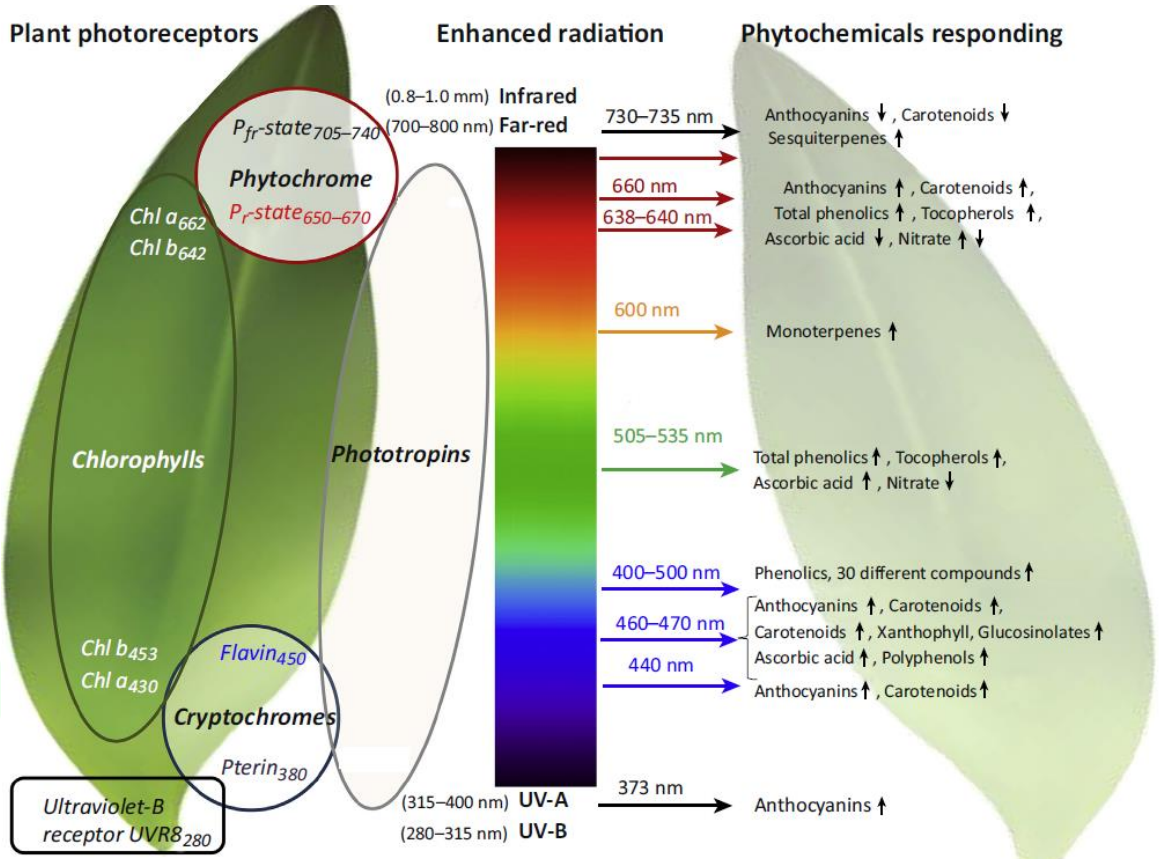
	نوردهی فتوپریودیکی	نوردهی فتوسنتزی
هدف اصلی	تنظیم فرآیندهای وابسته به طول روز مانند گلدهی یا جلوگیری از گلدهی	افزایش فتوسنتز و در پی آن افزایش رشد و نمو گیاه

کاربرد در گیاهان	گیاهان زینتی گلدار، توت فرنگی و برخی سبزی‌ها	انواع مختلف گیاهان
شرایط استفاده	زمانی‌که طول روز مطلوب نیست به همراه شرایط مطلوب دمایی	زمانی‌که شدت نور تجمعی (DLI) کم است
زمان کاربرد در شبانه روز	در طول شب، یا کاربرد قبل از غروب آفتاب یا قبل از طلوع	طی روز در شرایط نور طبیعی با شدت کم یا پایان روز برای افزایش طول روز در روزهای کوتاه
شدت معمول مورد استفاده	۱ تا ۲ میکرومول بر متر مربع در ثانیه	حداقل ۵۰ تا ۷۵ میکرومول بر متر مربع در ثانیه تا شدت مورد نیاز برای اشباع نوری
طیف غالب مورد استفاده	قرمز و قرمز دور	قرمز و آبی یا ترکیبی فول اسپکتروم

گل انگیزی در ابتدا شامل تغییرات بیوشیمیایی می‌باشد، که در اثر دریافت مواد محرک از برگ انجام می‌گیرد و منجر به تغییر جوانه‌ها و تشکیل جوانه‌های زایشی می‌گردد. در گیاهان وابسته به طول روز، اثر محرک‌های محیطی مانند نور بر رفتارهای منجر به گلدهی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است و مشخص شده است نور قرمز و قرمز دور مهمترین نقش را در این فرآیند بازی می‌کنند. مطالعات نشان داده است که گیرنده نوری فیتوکروم نقش تنظیمی اساسی در این نوع تغییر کیفیت نور دارد. همچنین مشخص شده است که دما می‌تواند نیاز نوری برای شروع گلدهی در بسیاری از گیاهان وابسته به نور را تغییر دهد. برای مثال در ارقام روز کوتاه توت‌فرنگی حداکثر گل‌انگیزی در طول روز کوتاه و دمای پایین رخ می‌دهد (Heide et al., 2013). به طور معمول، در ارقام روزکوتاه توت فرنگی در شرایط روز بلند گل انگیزی رخ نمی‌دهد. اما در صورتی‌که شرایط دمای پایین وجود داشته باشد در برخی از ارقام این گروه گل انگیزی رخ می‌دهد. در این شرایط کوتاه نمودن طول روز می تواند به عنوان روشی برای القای گل انگیزی مطرح باشد (Zahedi and Sarikhani, 2016 and 2017). همچنین مشاهده شده ایت که نوردهی نور قرمز دور در گیاه روز کوتاه توت فرنگی در زمانی که طول روز بلند است می‌تواند سبب کاهش طول دمبرگ شده و از طرف دیگر سبب افزایش تعداد گل در بوته و کاهش فاصله تا زمان گلدهی شود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). کنترل گلدهی در گیاهان یکی از موارد کاربرد تجاری دستکاری شرایط محیطی بویژه نور در باغبانی کنترل شده می‌باشد و می‌توان با استفاده از این ویژگی و شناسایی نیازهای محیطی مورد نیاز، الگوی گلدهی گیاهان را متناسب با زمان مصرف و اهداف تجاری تعییر داد.

در همین راستا نیز در صورتی‌که قصد نوردهی با اهداف افزایش متابولیت‌های ثانویه را داریم یا بیان مسیرهای خاص بیوسنتز ترکیبات بیوشیمیایی برای ما اهمیت دارد می‌بایست فاکتورهای نوردهی مد نظر قرار گیرد. در شکل ۲ تاثیر کیفیت‌های مختلف نور بر سنتز ترکیبات بیوشیمیایی گیاهان آورده شده است.

با گسترش بسیار سریع تکنولوژی و تجهیزات نوردهی مصنوعی و همچنین امکان فیلتر کردن طیف‌های نوری، اهداف و جنبه‌های دیگری نیز از نوردهی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مشخص شده است که کاربرد طیف‌هایی از نور می‌تواند برای کاهش اثرات مخرب تنش‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در مورد طیف نور، این گیرنده‌های نوری هستند که با دریافت طیف خاصی از نور، بخشی از پاسخ به تنش را ایجاد می‌کنند. در حقیقت، به طور فزاینده‌ای آشکار شده است که گیرنده‌های نور کریپتوکروم‌ها، که عمدتاً در ناحیه نور آبی جذب دارند، به عنوان تنظیم کننده‌های کلیدی طیف وسیعی از واکنش‌های تنش گیاهی مانند خشکی، شوری، گرما و تابش زیاد عمل می‌کنند (Victor and Falleiros, 2018). همچنین فیلتر کردن طیف‌هایی از نور با استفاده از پوشش گلخانه یا اضافه کردن فیلتر به زیر پوشش گلخانه برای افزایش کیفیت و بهبود رشد برخی محصولات گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲- واکنش گیاهان به کیفیت نور. گیرنده‌های نور (کلروفیل a و b، فیتوکروم‌ها، کریپتوکروم‌ها، فوتوتروپین‌ها، گیرنده UVB و UVR8)، طیف‌های خاصی از نور را دریافت می‌کنند. افزایش در هر کدام از طیف‌های نوری، می‌تواند با فعال سازی طیفی از واکنش‌های فتوسیمیایی گیاهی، سبب ایجاد پاسخ‌های فتوشیمیایی شده و باعث افزایش یا کاهش مواد فیتوشیمیایی گردد (برگرفته از Holopainen et al., 2018 با کمی تغییر).

منابع

آقاکریم، ف. ۱۳۹۵. تاثیر نوردهی پایان روز روی برخی از ویژگی های رشدی و فیتوشیمیایی گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L). پایان نامه کارشناسی ارشد در گرایش گیاهان دارویی علوم باغبانی، دانشگاه بوعلی سینا. ۷۷ص.

احتشامی س.، ساری خانی ح.، ارشادی ا.، امیری پریان ج. ۱۳۹۳. تأثیر پاکت گذاری بر برخی از ویژگی های کیفی و کاهش آفتاب سوختگی انار رقم رباب نیریز. نشریه علوم باغبانی ۴۵: ۳۵۳ تا ۳۶۰

پاکان پ.، ارشادی ا.، ساری‌خانی ح. و سیاری م. ۱۳۹۷. تأثیر نوردهی تکمیلی بر مورفولوژی برگ توت فرنگی رقم کاماروسا در شرایط گلخانه. نهمین همایش ملی یافته‌های پژوهشی کشاورزی با محوریت توت فرنگی، ۱۹ و ۲۰ اردیبهشت، دانشگاه کردستان. سنندج.

ساری‌خانی ح.، ۱۳۹۲. تأثیر نور فرابنفش A بر رشد و برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی نعناع فلفلی (*Mentha piperita*). فناوری تولیدات گیاهی، ۱۳ (۲): ۳۵ تا ۴۴.

شاهبداغلو ع.، عزیزی ع.، ساری‌خانی ح.، رجبی م. ۱۳۹۵. پیامدهای پرتودهی با نور فرابنفش A بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، سینارین و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک سه رقم آرتیشو. علوم و فنون کشتهای گلخانه ای ۲۸: ۹۷ تا ۱۰۹.

موسوی فتاح م. و ساری‌خانی، ح. ۱۳۹۵. تاثیر کیفیت نور و برخی تنظیم کننده‌های رشد بر شاخه‌زایی درون شیشه‌ای پایه گلابی OH × F333. علوم باغبانی ایران، ۴۷(۱): ۴۵ تا۵۴.

نوروزی م.، ساری‌خانی ح. ، غلامی م.، زاهدی س.م ، ۱۳۹۵. تأثیر نوردهی نور قرمز در پایان روز بر ویژگی‌های مورفولوژیک، عملکرد و کیفیت میوه توت فرنگی رقم کوین الیزا در شرایط روز کوتاه. علوم و فنون کشتهای گلخانه ای ۲۸: ۱۷۵ تا ۱۸۳.

Akiyama T., Kozai T. 2016. Light Environment in the Cultivation Space of Plant Factory with LEDs. In: Kozai T., Fujiwara K., Runkle E.S. (Eds). LED Lighting for Urban Agriculture; Springer: Singapore, pp. 91-109.

Castilla N. 2012. Greenhouse Technology and Management. CABi publisher.

Heide, O.M., Stavang, J.A., Sonsteby, A. 2013. Physiology and genetics of flowering in cultivated and wild strawberries- a review. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 88(1): 1-18.

Higuchi, Y., Hisamatsu, T. 2016. Light Acts as a Signal for Regulation of Growth and Development. In: Kozai T., Fujiwara K., Runkle E.S., (Eds). LED Lighting for Urban Agriculture; Springer: Singapore, pp. 57–73.

Hollosy F. 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. Micron. 33(2): 179-97.

Holopainen J.K., Kivimäenpää M., Julkunen-Tiitto R. 2018. New light for phytochemicals. Trends Biotechnology, 36(1):7-10.

Jamshidian S., Ghasemnezhad M., Bakhshi D., Sarikhani H. 2010. Reflected light improves berry quality and phenolic content of *Vitis vinifera* cv. Askary. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 51(1): 1-5.

Kozai T., Niu G., 2016. Role of the Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL) in Urban Areas. Kozai T., Niu G., Takagaki M., (Eds). Plant Factory, Academic Press, Pages 7-33.

Lichtenthaler HK. 1998. The stress concept in plants: an introduction. Annals of the New York Academy of Sciences, 851:187-98.

Massa, G.D., Kim H.H., Wheeler R.M., Mitchell C.A. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. HortScience, 43(7): 1951-1955.

Paradiso, R., Proietti, S. 2021. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems. Journal of Plant Growth Regulation, DOI: 10.1007/s00344-021-10337-y.

Rajapakse, N.C., Shahak, Y. 2007. Light-quality manipulation by horticulture industry. In: Whitelam, G and Halliday, C.K.J (Eds) Light and plant development. Wiley-Blakwell, pp. 290-310.

Sarikhani H., Sarikhani-khorami H. 2021. Effect of light quality on micropropagation and some morphological properties of Cadaman (*Prunus davidiana* × *Prunus persica*) rootstock. International Journal of Horticultural Science and Technology, 8(1): 51-65.

Taiz L., Zeiger E., Møller I.M., Murphy A. 2015. Plant physiology, 6th ed. Sinauer Associates Inc., Massachusetts, 761 p.

Zahedi S.M., Sarikhani H. 2016. Effect of far-red light, temperature, and plant age on morphological changes and induction of flowering of a June-bearing strawberry. Horticulture, Environment, and Biotechnology 57 (4), 340-347.

Zahedi S.M., Sarikhani H. 2017. The effect of end of day far-red light on regulating flowering of short-day strawberry (*Fragaria× ananassa* Duch. cv. Paros) in a long-day situation. Russian Journal of Plant Physiology, 64 (1), 83-90.

Victor D.D., Falleiros C.R., 2018. Cryptochrome-related abiotic stress responses in plants. Frontiers in Plant Science, 9: 1897.

Artificial lighting to control plant growth, photomorphogenesis and production of secondary metabolites

Hassan Sarikhani
Department of Horticultural Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan-Iran.
Corresponding Author: sarikhani@basu.ac.ir

Abstract

Light properties including light quantity (intensity and duration) and quality (wavelength) are important factors affecting the growth and physiology of plants. In addition to providing the energy needed for photosynthesis, light plays a very important signaling role in some important plant processes including growth and photomorphogenesis. Although high light intensity is a problem in many parts of the country, but due to the different conditions of plant growing systems, including growth chamber, plant factory, phytotron and greenhouse, artificial exposure to increase the quality and quantity of production is inevitable. The technology and knowledge of artificial lighting has increased dramatically in recent years. Meanwhile, the use of spectra emitted by light emitting diodes (LEDs), which offer several advantages such as the ability to adjust spectrum and intensity of light compared to other conventional light sources, increases the use of artificial lighting in fully controlled environments and also in greenhouses. Artificial lighting is used for a variety of purposes, including lighting to fully controlled environments, complementary lighting, lighting to increase day length, and lighting to produce plant secondary metabolites. The effect of light spectrum and how it is effect on photosynthesis, photoperiodic processes as well as the production pathways of secondary metabolites are the physiological goals of artificial lighting. This knowledge can be used in protected agriculture to increase the quantity and quality of the crop. This article gives an overview of the effect of artificial light properties on plant growth, photomorphogenesis and production of secondary metabolites in horticultural plants.

***Keywords*:** Floriculture, Plant propagation, Pomology, Postharvest physiology, Vegetable crops.