مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۵۳-۴۳

تأثیر شدت‌های مختلف نور بر کارایی مصرف آب محصول کاهو تحت شرایط کنترل‌شده

مریم اسمعیلی[۱]، محمود مشعل[۲*]، ساسان علی‌نیایی‌فرد[۳]، بهزاد آزادگان[۴]
۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. استادیار، گروه باغبانی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۵

چکیده

نور یکی از فاکتورهای اصلی تنظیم‌کننده رشد و نمو گیاهی است. در بین جنبه‌های مختلف نور، شدت نور تأثیر عمده‌ای در تنظیم واکنش‌های گیاهی از جمله روابط آبی گیاه دارد. به‌منظور ارزیابی تأثیر شدت نور بر میزان عملکرد، تبخیر- تعرق، کارایی مصرف آب محصول کاهو آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار و دوازده تکرار در پارک علم و فناوری پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد. ازآنجایی‌که طیف نوری آبی و قرمز طیف‌های اصلی دخیل در رشد و روابط گازی هستند، در آزمایش حاضر با استفاده از ترکیب نور قرمز- آبی با نسبت ۷۰ درصد قرمز و ۳۰ درصد آبی و با چهار شدت مختلف شامل (T1) ۷۵، (T2) ۱۵۰، (T3) ۳۰۰ و (T4) ۶۰۰ $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ انجام شد. صفت‌های مورد مطالعه شامل خصوصیات رشدی مرتبط با کارایی مصرف آب بودند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیش‌ترین وزن تر مربوط به شدت نور (T3) ۳۰۰ $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ و کم‌ترین آن مربوط به شدت نور (T3) ۷۵ $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ به‌ترتیب برابر با ۷۳/۵۲ و ۱۷/۳۱ گرم به‌دست آمد. افزایش شدت نور موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی و سطح برگ شد. هم‌چنین بیش‌ترین کارایی مصرف آب در تیمار (T4) ۶۰۰ و کم‌ترین آن در تیمار (T1) ۷۵ $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: تبخیر- تعرق، روزنه، طیف نور، عملکرد، گلخانه.

Effect of different light intensities on water use efficiency of lettuce under controlled conditions

Maryam Esmaili[1], Mahmoud Mashal[2*], Sasan aliniaeifard[2], Behzad Azadegan[4]
Ph.D. Candidate, Department of water engineering, Aburaihan campus, university of Tehran, Tehran, Iran.
Associate Professor, Department of water engineering, Aburaihan campus, university of Tehran, Tehran, Iran.
Assistant Professor, Department of Horticulture, Aburaihan campus, university of Tehran, Tehran, Tehran.
Associate Professor, Department of water engineering, Aburaihan campus, university of Tehran, Tehran, Iran.
Received: May 26, 2019 Accepted: September 06, 2019

Abstract
Light is one of the main factors regulating plant growth and development. Among different aspects of light, its intensity has a great effect on plant responses, such as plant's water relations. The aim of this study was to evaluate the effect of light intensity on performance, evapotranspiration and water use efficiency of lettuce (*Lactuca sativa cv. par tavousi*) in a completely randomized design with four treatments and twelve replications in the Park of Science and Technology in Aburaihan campus of Tehran University. The present experiment was done by using spectra composition of red and blue (as the main wavebands on growth and gas relations) with a ratio of 70 and 30 %, respectively with four intensities including (T1) 75, (T2) 150, (T3) 300 and (T4) 600 $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$. The studied traits included growth characteristics associated with water use efficiency. Based on the results, the highest fresh weight (73.52 g) was obtained from T3 and the lowest fresh weight (17.31 g) was obtained under light intensity T3, respectively. Any light intensity increasing caused an increasing in dry weight and leaf area. The highest growth simulation was observed under T3. Furthermore, the highest and the lowest water use efficiencies were observed in plants that were grown under T4 and T1.

Keywords: Evapotranspiration, Greenhouse, Light Spectrum, Production, Stoma.

* نویسنده مسئول Email: mmashal@ut.ac.ir

مقدمه

منابع آب شیرین با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان، در حال کاهش است (۲۲). دسترسی به آب مهم‌ترین عامل محدودکننده توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (۴). بخش کشاورزی با مصرف ۸۵-۸۰ درصد از منابع آب در مقایسه با متوسط مصرف جهانی که حدود ۷۰ درصد می‌باشد، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب است (۲)، بنابراین مصرف بهینه و افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده آب حائز اهمیت می‌باشد (۱). شناخت چگونگی و مدیریت تأثیر عوامل اکولوژیکی بر تولید گیاهان و نیز واکنش گیاهان به این عوامل، از مهم‌ترین لوازم دستیابی به پایداری در سیستم‌های تولیدی کشاورزی به‌شمار می‌روند. یکی از راهکارهای افزایش تولید با مصرف آب کم‌تر، کشت در محیط‌های کنترل‌شده و گلخانه می‌باشد. به‌منظور کشت در گلخانه، عوامل محیطی مختلفی تأثیرگذار می‌باشد.

در بین عوامل محیطی تأثیرگذار بر رشد و نمو گیاهان، نور از مهم‌ترین عوامل محیطی است که منبع نامحدودی از انرژی را برای گیاه فراهم می‌آورد و شدت و کیفیت آن رشد و نمو گیاهان را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۰). مشخص شده است که افزایش میزان ماده خشک گیاهی با نوری که دریافت می‌کند، در ارتباط است. از طرفی شدت بالای نور با افزایش مصرف آب در گیاه باعث ایجاد حرارت در گیاه می‌شود. متعاقباً گیاه برای این‌که بتواند خودش را خنک نگه دارد آب را از طریق روزنه، طی فرآیند تبخیر و تعرق، از دست می‌دهد و در نتیجه مصرف آب افزایش می‌یابد. در نتیجه کارایی مصرف آب[1] میزان ماده خشک تولیدشده به‌ازای آب مصرف‌شده یا در اصطلاح فیزیولوژیکی به نسبت بین کربن تثبیت‌شده به میزان تعرق گیاه تعریف می‌شود و ارزیابی می‌کند که چگونه میزان آب و سایر فاکتورها می‌توانند عملکرد و کارایی گیاهان را تحت تأثیر قرار دهند. با توجه به این‌که مصرف آب در گیاه و فتوسنتز، دو عامل اصلی تعیین‌کننده کارایی مصرف آب در گیاه هستند و با توجه به این‌که این دو عامل به‌طور مستقیم به شدت نور وابسته هستند، بنابراین دست‌یابی به بهترین کارایی مصرف آب به شدت نور مطلوب بستگی دارد (۵). پرورش گیاهان در شدت نور پایین باعث افزایش ارتفاع و سطح ویژه برگ[2] می‌شود. درحالی‌که افزایش شدت نور باعث کاهش سطح ویژه برگ شده و سازگاری‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی درگیاه برای محافظت گیاه از شدت بالای نور ایجاد می‌شود. شدت نور نقش مهمی را در رشد گیاهان بازی می‌کند، شدت نور پایین باعث محدودشدن رشد گیاه بوسیله تأثیر بر تبادلات گازی گیاه از طریق تأثیر بر روزنه‌ها می‌شود (۲۷) درحالی‌که شدت نور بالا باعث ایجاد خسارت در دستگاه فتوسنتزی می‌شود (۱۵).

سلول‌های روزنه به‌عنوان مهم‌ترین جز از بافت گیاهی، نقش اساسی در تبادلات گازی بین بافت درونی گیاه و محیط بیرون ایفا می‌کند. نمو روزنه‌ها در گیاهان وابسته به شدت نور است، بنابراین تغییر در شدت نور باعث تغییر در هدایت روزنه‌ای می‌شود (۱۴). مشخص شده است که تغییر در خصوصیات روزنه‌ای باعث تغییر در هدایت هیدرولیکی گیاه می‌شود و با توجه به این‌که کارایی مصرف آب تابعی از خصوصیات هیدرولیکی گیاه است، بنابراین خصوصیات روزنه‌ای ارتباط بسیار نزدیکی با کارایی مصرف آب در گیاهان دارد (۲۱). با این‌حال، تحقیقات کافی در زمینه شدت‌های نوری مختلف و تأثیر

1. Water Use Efficiency (WUE)

2. Special Leaf Area (SLA)

آن بر کارایی مصرف آب در گیاهان و بهینه‌سازی مصرف آب در این زمینه صورت نگرفته است. اخیراً در دنیا تمایل به کشت سبزیجات برگی در محیط‌های بسته کنترل‌شده تحت نورهای الای‌دی قرمز و آبی وجود دارد. شدت‌های مختلف نور بر رشدونمو و خصوصیات روزنه‌ای و در نتیجه بر روابط آبی گیاهان تأثیر می‌گذارد. با توجه به این‌که کاهو یکی از مهم‌ترین سبزی‌های برگی است و سطح زیر کشت وسیعی را هم در محیط گلخانه و هم در فضای باز در ایران و در سایر نقاط دنیا به‌خود اختصاص داده است، میزان قابل‌توجهی از آب صرف تولید این محصول می‌شود. بنابراین هدف اصلی از این تحقیق برآورد میزان تبخیر- تعرق کاهو تحت شدت‌های مختلف نور و برآورد کارایی مصرف آب در این گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشد

به‌منظور انجام آزمایش ابتدا بذرهای کاهو واریته پرطاووسی (*Lactuca sativa* cv. par tavousi) در سینی کشت در بستری از کوکوپیت و پرلیت با نسبت (۲:۱) کاشته شدند و در اتاقک‌های رشد در زیر نور سفید با رطوبت نسبی ۴۰ درصد با دمای روزانه ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای شبانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. به‌منظور جوانه‌زنی بذرها در روزهای اول، سینی کشت به‌صورت روزانه آبیاری می‌شدند و پس از جوانه-زنی تا ظهور برگ‌های حقیقی سینی کشت به‌صورت یک روز در میان آبیاری شد. برای انجام آزمایش از گلدان‌هایی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر قطر و ۲۰ سانتی‌متر ارتفاع استفاده شد. بستر کشت در گلدان‌ها، از خاک مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران انتخاب شد که برای کلیه گلدان‌ها، بستر کشت یکسان بود. سپس نشاها در مرحله سه تا چهار برگی به‌صورت یکنواخت به گلدان‌ها منتقل شدند. اطلاعات تاریخ کاشت در جدول (۱) نشان داده شده است. پس از انتقال نشاها به گلدان به‌منظور تغذیه گیاهان از محلول غذایی هوگلند استفاده شد. نحوه استفاده از محلول غذایی به این صورت بود که در مراحل ابتدایی رشد محلول نیم غلظت هوگلند به گیاهان داده شد و پس از این‌که گیاهان در گلدان‌ها مستقر شدند، از محلول هوگلند کامل در طول دوره رشد با فاصله ۲ روز استفاده گردید. برای جلوگیری از تجمع املاح پس از سه دوره استفاده از محلول غذایی در یک مرحله از آب مقطر به‌منظور آبیاری گیاهان استفاده شد.

جدول ۱. تاریخ مراحل مختلف کاشت کاهو

کاشت نشا	کاشت در گلدان	اولین آبیاری	برداشت نهایی
۱۳۹۶/۱۰/۴	۱۳۹۶/۱۰/۱۴	۱۳۹۶/۱۰/۱۴	۱۳۹۶/۱۱/۳۰

اعمال تیمار

به‌منظور بررسی اثر شدت نور بر روی گیاه کاهو، آزمایشی به‌صورت کاملاً تصادفی در دوازده تکرار طراحی شد که در آن چهار تیمار مختلف شدت نور در نظر گرفته شد. تیمارهای شدت نور شامل (T1) ۷۵، (T2) ۱۵۰، (T3) ۳۰۰ و (T4) ۶۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) بودند. برای اعمال تیمارهای نوری اتاقک‌های رشد با ابعاد ۱×۱×۱ متر ساخته شدند و از لامپ‌های LED با نسبت ۷۰:۳۰ نور قرمز و آبی با طول موج ۶۱۵ تا ۶۸۵ نانومتر برای نور قرمز و ۴۱۵ تا ۵۰۰ نانومتر برای نور آبی (شرکت پرتو رشد نوین) برای تأمین شدت‌های نوری استفاده شد. لامپ‌های LED دارای مزایای متنوعی همچون توانایی در تنظیم و ترکیب طیف‌ها، کارایی بهتر نسبت به انرژی ورودی یا نور تولیدی، طول موج‌های اختصاصی و دمای پایین هستند، که آنها را برای رشد گیاهان مناسب می‌کند. این منابع

نوری طول موج‌های اختصاصی که می‌توانند به‌وسیله گیرنده‌های نوری گیاهی دریافت شوند را برای رشد و متابولیسم گیاهی فراهم می‌کنند. توانایی استفاده هدفمند از طول موج‌ها ما را قادر می‌سازد رشد و نمو گیاهان و تولیدات آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهیم (۱۶). نور قرمز و آبی به‌عنوان طول موج‌های جذب‌شده توسط رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌گونه‌ای مؤثر برای فتوسنتز گیاهان به‌کار برده می‌شود. تمرکز اصلی برای نور آبی در طول موج ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر و برای نور قرمز ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است. نور قرمز ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر تأثیر عمده‌ای در فتوسنتز و رشد و نمو گیاهان دارد. جهت اطمینان از طول موج‌ها و شدت‌های تنظیم‌شده از دستگاه اسپکترومستر (Spectromaster SEKOINC C-7000, Japan) استفاده شد. ساعت روشنایی و تاریکی (فتوپریود)[1] با استفاده از تایمر روی ۱۲ ساعت روز (از ۸ صبح تا ۸ شب) و ۱۲ ساعت شب (از ۸ شب تا ۸ صبح روز بعد) تا پایان دوره آزمایش تنظیم شد.

اندازه‌گیری پارامترهای خاک، روش آبیاری، محاسبه تبخیر- تعرق و کارایی مصرف آب

برای محاسبه عمق آب آبیاری، از رابطه نیاز آبی (رابطه ۱) استفاده شد که در آن ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، بر روی نمونه خاک در درون گلدان‌های کشت، به‌دست آورده شد، سپس مقدار آب آبیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$d_n = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times \rho_b \times D \times MAD \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن (d_n) عمق خالص آب آبیاری، (θ_{fc}) رطوبت خاک درنقطه FC، (θ_{pwp}) رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم، (ρ_b) وزن مخصوص ظاهری خاک، (D) عمق مؤثر ریشه و (*MAD*) حداکثر تخلیه رطوبتی مجاز تعریف شده است.

برای آبیاری گلدان‌ها، در ابتدا خاک را به حد ظرفیت زراعی رسانده و در هر نوبت آبیاری، هر گلدان وزن شد و به میزان تفاوت گلدان با وزن موردنظر، آب به آن اضافه گردید. در حقیقت مقدار زه‌آب خارج‌شده از هر گلدان و وزن گلدان در زمان آبیاری به‌دست آورده و اختلاف مجموع این وزن با وزن FC محاسبه شد که حاصل آن معادل با میزان تبخیر- تعرق از سطح گیاه و مقدار آب مصرف‌شده توسط گیاه خواهد بود. دور آبیاری برای کلیه تیمارها یکسان و دور روز در میان بود. میزان کمبود آب هر گلدان نشان‌دهنده میزان تبخیر- تعرق آن طی دوره‌ی آبیاری بود که اطلاعات آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. حجم کل آب آبیاری در طول دوره رشد کاهو

تیمار	میزان تبخیر- تعرق در طول دوره رشد (میلی‌لیتر)	میزان آب آبیاری در طول دوره رشد (میلی‌لیتر)
۷۵	۸۳۰/۴	۹۰۴/۹
۱۵۰	۹۶۵/۷	۹۷۸/۸
۳۰۰	۱۴۷۵/۵	۱۵۱۴/۴
۶۰۰	۱۶۲۱/۲	۱۶۲۴/۴

برای محاسبه کارایی مصرف آب، میزان آب مصرف‌شده در طول دوره رشد یادداشت گردید و پس به‌دست‌آوردن وزن خشک نمونه‌ها، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (۲۶):

$$WUE = D/W \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن (D) وزن خشک محصول تولیدی و (W) میزان آب آبیاری می‌باشد.

1. Photoperiod

خصوصیات روزنه‌ای

خصوصیات مورفولوژی روزنه‌ای شامل طول و عرض روزنه، طول و عرض شکاف روزنه در برگ‌های جوان، بالغ و توسعه‌یافته در پایان آزمایش اندازه‌گیری شد. برای این منظور اپیدرم زیرین برگ‌های جوان توسعه‌یافته که هنوز به گیاه متصل بودند با یک لایه نازک از لاک شفاف پوشیده شد، پس از گذشت ۱۰ دقیقه و خشک‌شدن لاک، با استفاده از چسب نواری شفاف لاک خشک‌شده از روی برگ جدا گردید و روی لام قرار گرفت. لام‌های حاوی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Omax با بزرگنمایی 40X بررسی شدند. در نهایت عکس روزنه‌ها با استفاده از دوربین متصل به میکروسکوپ و نرم‌افزار Omax top view نسخه ۳,۵ تهیه شد. عکس‌های تهیه‌شده با استفاده از نرم‌افزار imageJ (U.S. National Institutes of Health, Bethesda,MD; http://imageJ.nih.gov/ij/) مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای بررسی خصوصیات روزنه‌ای ۱۰۰ عکس روزنه به‌ازای هر تیمار نوری مورد ارزیابی قرار گرفت (۳).

محاسبات آماری

برای تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته در مطالعه حاضر از نرم‌افزار GraphPad Prism 7.3 و نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد. مقایسه میانگین صفات با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام پذیرفت. داده‌های مربوط به خصوصیات مورفولوژی روزنه توسط نرم‌افزار GraphPad Prism 7.3 در سطح احتمال ۵ درصد برای بررسی عدم معنی‌داری مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در تیمارهای مختلف شدت نور در جدول (۳) ارائه شده که در ادامه هر صفت به‌صورت جداگانه مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه کاهو تحت تیمار شدت‌های مختلف نور

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		دما	وزن تر	وزن خشک	کارایی مصرف آب	سطح ویژه برگ
تیمار	۳	^{ns}۰/۵۸۰	**۲۵۳۱/۸۳	**۲۲/۳۵	**۴/۹۸	**۱۳۴۸۲۲/۷۳
خطا	۸	۰/۲۱	۶/۲۸	۰/۰۶	۰/۰۲	۲۸۸۲/۸۷

، * و ns: معنی‌داری در سطح ۹۹ و ۹۵ درصد و نبود معنی‌داری.

جدول ۴. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه کاهو در تیمارهای مختلف شدت نور

شدت‌های نور	وزن تر اندام هوایی (گرم)	وزن خشک اندام هوایی (گرم)	سطح ویژه برگ (سانتی‌مترمربع بر گرم)	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر لیتر)
T1	۱۷/۳۱^{c}	۰/۷۹^{d}	۶۷۱^{a}	۰/۵۶^{d}
T2	۲۷/۶۷^{b}	۱/۴۷^{c}	۴۹۰/۴۱^{b}	۱/۰۱^{c}
T3	۷۳/۵۲^{a}	۳/۷۸^{b}	۳۷۸/۲۹^{c}	۲/۰۴^{b}
T4	۷۰/۹۶^{a}	۶/۸۳^{a}	۱۶۵/۱۸^{d}	۳/۴۷^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون برای سطوح هر تیمار، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (P≤۰/۰۵).

جدول ۵. مقایسه تغییرات نسبی میانگین صفات مورد مطالعه کاهو در چهار سطح مختلف شدت نور

شدت‌های نور	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	سطح ویژه برگ	کارایی مصرف آب
T1	−۷۶/۴۵	−۷۹/۱	+۷۷/۳	−۷۲/۵
T2	−۶۱	−۶۱/۱	+۲۹/۶	−۵۰/۵
T3 (شاهد)	۰	۰	۰	۰
T4	−۳/۴۸	+۸۰/۶۸	−۵۶/۳	+۴۱/۲

دما

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌های مربوط به دمای گیاهان در شدت‌های مختلف نور، بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای نوری بود و تیمارها از نظر مقایسه میانگین در یک گروه آماری قرار گرفتند.

سطح ویژه برگ

پارامترهایی همچون آناتومی، مورفولوژی و فیزیولوژی برگ‌ها به‌طور قوی تحت تأثیر تغییر در طول موج‌ها و شدت‌های نوری هستند (۱۰). نلیس و همکاران (۱۷) نشان دادند که نور قرمز و آبی به‌طور قوی فیزیولوژی و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. نتایج حاصل از بررسی داده‌های مربوط به روند رشدی به این صورت بود با افزایش شدت نور، سطح ویژه برگ نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت به‌طوری‌که در تیمار T1 نسبت به تیمار T3 به میزان ۷۷ درصد افزایش داشت (جدول ۵). هم‌چنین نتایج حاصل از آزمایش پایوا و همکاران (۱۸) نشان داد که با کاهش شدت نور شاخص مساحت برگ افزایش داشت.

وزن تر اندام هوایی

وزن تر یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی تیمارهای مختلف شدت نور بر محصول کاهو می‌باشد. طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از شدت‌های مختلف نور بر وزن تر گیاهان رشد یافته در شدت‌های مختلف نور نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد بین تیمارها بود که این نشانه تأثیر شدت نور بر وزن اندام هوایی کاهو می‌باشد. وزن تر اندام هوایی در تیمارهای شدت نور نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت به‌طوری‌که میزان وزن تر در تیمارهای T1، T2 و T4 به‌ترتیب ۷۶، ۶۱ و ۳ درصد کاهش در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین صفات رشدی و مورفولوژی در گیاهان تحت تیمار شدت‌های مختلف نور به این‌صورت بود که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان وزن‌تر به‌ترتیب در تیمار T3 و T1 مشاهده شد. از لحاظ آماری تیمارهای T1 و T2 در دو گروه مختلف آماری و دو تیمار دیگر در یک گروه قرار گرفتند (جدول ۴). به‌طور کلی رشد و در نهایت میزان تولیدات گیاهان وابسته به فرایند فتوسنتز در گیاهان است که این فرایند نیز به‌صورت پویا وابسته به محیط نوری است (۲۷). ویگیو و همکاران (۲۵) براساس آزمایشی که بر روی کاهو انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت نور، عملکرد محصول افزایش می‌باشد که بیش‌ترین محصول کاهو در شدت نور ۶۰۰ $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ گزارش کردند. کانگ و همکاران (۱۱) نیز اظهار داشتند با افزایش شدت نور، عملکرد کاهو افزایش می‌یابد که با نتایج حاضر در این تحقیق همخوانی دارد.

وزن خشک اندام هوایی

طبق نتایج حاصل از داده‌های به‌دست‌آمده از جدول

تجزیه واریانس حاصل از داده‌های به‌دست‌آمده وزن خشک تحت شدت‌های مختلف نور بیانگر تفاوت معنی-دار در سطح ۱ درصد بود (جدول ۳). بررسی نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌های وزن خشک اندام هوایی نشان‌دهنده بیش‌ترین و کم‌ترین میزان وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای T4 و T1 بود (جدول ۴). با بررسی مقایسه میانگین داده‌ها مشخص شد که تیمار T3 پس از تیمار نوری T4 بیش‌ترین وزن تر را داشت. صفت وزن خشک اندام هوایی در دو تیمار T1 و T2 به‌ترتیب ۷۹ و ۶۱ درصد کاهش عملکرد نسبت به تیمار T3 و تیمار نوری T4 نسبت به تیمار شاهد مقدار ۸۰ درصد افزایش عملکرد را نشان داد (جدول ۵). براساس بررسی‌های صورت‌گرفته در ارتباط نمودار تغییرات وزن خشک نشان داد که شیب نمودار رشدی گیاهان در شدت نور T4 نسبت به سایر تیمارهای نوری بیش‌تر بود و کم‌ترین شیب رشدی در تیمار نوری در T1 به‌دست آمد. با افزایش شدت نور وزن تر و وزن خشک افزایش می‌یابد که نتایج این مطالعه با نتایج ارائه‌شده توسط نایت و میشل (۱۲)، تیبیت و همکاران (۲۳) مطابقت دارد.

سطح ویژه برگ

سطح ویژه برگ یکی از پاسخ‌های مورفو- فیزیولوژیکی گیاهان در ارتباط با نور است که در آن برگ گیاهان در پاسخ به موانع و محدودیت‌های موجود در محیط به‌ویژه شدت نور، پاسخ مناسب را ارائه می‌دهد. مقدار بالای سطح ویژه برگ نشان‌دهنده برگ نازک با گستردگی بالاتر است درحالی‌که سطح ویژه برگ کم‌تر نشان‌دهنده برگ ضخیم‌تر با گستردگی کم‌تر است (۷). طبق نتایج تجزیه و تحلیل آماری بین تیمارهای مختلف شدت نور در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌دار وجود داشت و شدت نور بر سطح ویژه برگ اثر به‌سزایی داشته است (جدول۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌های مربوط به سطح ویژه برگ در شدت‌های مختلف نوری بیانگر بالاترین میزان سطح ویژه برگ در تیمار نور ۷۵ میکرومول بر مترمربع درثانیه بود و با افزایش شدت نور میزان سطح ویژه برگ نیز کاهش یافت به‌طوری‌که کم‌ترین میزان سطح ویژه برگ در تیمار نوری ۶۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه به‌دست آمد (جدول ۴). براساس نتایج جدول (۵) دو تیمار نوری ۷۵ و ۱۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه به‌ترتیب ۷۷ و ۲۹ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد و تیمار T4 کاهش ۵۶ درصدی را نشان داد. طبق نتایج مطالعات پیشین، با افزایش شدت نور سطح ویژه برگ در گیاهان کاهش می‌یابد و در شدت نور پایین سطح ویژه برگ بالاتری به‌دست می‌آید که چنین نتایجی در مورد گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی نیز مشاهده شد (۶).

کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب به‌عنوان یک فاکتور برای تعیین تولیدات گیاهی نسبت به میزان آب مصرفی می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که تیمارهای شدت نور مختلف بر کارایی مصرف آب دارای اثر معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد هستند (جدول ۳). نتایج حاصل از بررسی مقایسه میانگین داده‌های مربوط به کارایی مصرف آب، نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین کارایی مصرف آب به‌ترتیب در تیمار نور T4 و T1 به‌دست آمد. نتایج نشان دادند که با افزایش شدت نور کارایی مصرف آب افزایش یافت به‌طوری‌که دو تیمار T1 و T2 میزان ۷۲ و ۵۰ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد و تیمار T4 میزان ۴۱ درصد افزایش را نشان دادند (جدول ۵). هم‌چنین تیمارها در چهار گروه متفاوت آماری قرار گرفتند (جدول ۴). WUE با تعادل بین تعرق و فتوسنتز تعیین می‌شود که این تعادل بسیار تحت تأثیر شرایط محیطی می‌باشد (۱۹).

خصوصیات روزنه

روزنه‌ها مهم‌ترین کانال ارتباطی بین فضای درونی گیاه و محیط اطراف گیاه است مهم‌ترین نقش را در تبادلات گازی و هدایت هیدرولیکی گیاه بازی می‌کنند. پس از بررسی‌های صورت‌گرفته در ارتباط با خصوصیات روزنه‌ای تحت شدت‌های مختلف نوری نتایج به شرح زیر ارائه‌شده است.

طول روزنه

نتایج به‌دست‌آمده از جدول تجزیه واریانس طول روزنه نشان داد که تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪ بین تیمارها وجود داشت (جدول ۶) و شدت نور بر طول روزنه اثر معنی‌دار داشته است. براساس نتایج مقایسات میانگین کم‌ترین طول روزنه در تیمار T2 به‌دست آمد و در سایر تیمارها طول روزنه در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۷). طول روزنه در تیمار T1 و T4 به‌ترتیب ۲ و ۳۶ درصد کاهش و در تیمار T2، ۳۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد (جدول ۸). براساس نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق پالردی و کوزلوسکی (۱۹)، پاسخ خصوصیات روزنه برشدت نور معنی‌دار شد. هیو و همکارن (۹) به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت نور خصوصیات آن تحت تأثیر قرار خواهد گرفت و تعداد روزنه تحت نور آبی- قرمز افزایش خواهد یافت.

جدول ۶. تجزیه واریانس خصوصیات روزنه کاهو تحت تیمار شدت‌های مختلف نور

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (µm)			
		طول روزنه	عرض روزنه	طول منفذ روزنه	عرض منفذ روزنه
نور	۳	۲۹۱**	۱۷۸**	۱۶۴**	۱۰۴**
خطا	۳۹۶	۶/۵۲	۳/۱۱	۱/۹۹	۰/۸۴

جدول ۷. مقایسه میانگین خصوصیات روزنه کاهو در تیمارهای مختلف شدت نور

شدت‌های نور	طول روزنه (µm)	عرض روزنه (µm)	طول منفذ روزنه (µm)	عرض منفذ روزنه (µm)
T1	۲۶/۹۳^{a}	۱۶/۴۱^{b}	۱۷/۹۸^{b}	۶/۵۴^{d}
T2	۲۴/۰۳^{b}	۱۷/۱۹^{b}	۱۷/۳۶^{a}	۷/۴۶^{bc}
T3	۲۷/۶۷^{a}	۱۸/۳۴^{ab}	۱۷/۵۵^{a}	۷/۸۹^{b}
T4	۱۷/۵۵^{a}	۱۹/۴۷^{a}	۱۷/۶۷^{a}	۹^{a}

جدول ۸. مقایسه تغییرات نسبی میانگین خصوصیات روزنه کاهو در چهار سطح مختلف شدت نور

شدت‌های نور	طول روزنه	عرض روزنه	طول منفذ روزنه	عرض منفذ روزنه
T1	-۲/۶۷	-۱۰/۵	+۲/۴۵	-۱۷/۱۱
T2	+۳۶/۹۲	-۶/۲	-۱/۰۸	-۵/۴۴
T3(شاهد)	۰	۰	۰	۰
T4	-۳۶/۵۷	+۶/۱۶	+۰/۶۸	+۱۲/۳۳

عرض روزنه

براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عرض روزنه در شدت‌های مختلف نور مشخص شد که تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد دارای تفاوت معنی‌دار هستند (جدول ۷). نتایج مقایسات میانگین نشان داد که بیش‌ترین عرض روزنه در تیمار نور T4 و در تیمارهای T1 و T2 کم‌ترین عرض روزنه به‌دست آمد، این در حالی بود که در تیمار شاهد حالت بینابین داشت (جدول ۷). براساس نتایج جدول (۸)، عرض روزنه در دو تیمار T1 و T2 به‌ترتیب ۱۰ و ۶ درصد کاهش و در تیمار T4، ۰/۶۸ درصد افزایش داشت.

طول منفذ روزنه

نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که طول منفذ روزنه در سطح ۱ درصد دارای تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۶). هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که طول منفذ روزنه در تیمار T1 کم‌ترین اندازه را داشت این در حالی بود که طول منفذ روزنه در سایر تیمارها در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۷). با افزایش شدت نور، طول منفذ روزنه افزایش یافت به‌طوری‌که در تیمار T1 به میزان ۲ افزایش و در تیمار T2 میزان ۱ درصد کاهش را نشان داد و در تیمار T4 طول منفذ روزنه ۰/۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت (جدول ۸). وانگ و همکاران (۲۴) اظهار داشتند که با افزایش شدت نور طول و عرض دهانه روزنه افزایش می‌یابد که راستای نتیجه این تحقیق می‌باشد.

عرض منفذ روزنه

عرض منفذ روزنه به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیت روزنه‌ای نشان‌دهنده میزان باز بودن دهانه روزنه است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول تجزیه واریانس داده‌ها، نتایج بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد دارای تفاوت بین تیمارها بود (جدول ۶). علاوه بر این، بر اساس نتایج جدول مقایسات میانگین بیش‌ترین و کم‌ترین گشودگی دهانه روزنه به‌ترتیب در تیمار T4 و T2 به‌دست آمد. این در حالی بود که دو تیمار نوری دیگر با اختلاف اندکی در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۷). با افزایش شدت نور، عرض منفذ روزنه نیز افزایش یافت به‌طوری‌که در تیمار T4 نسبت به تیمار شاهد ۱۲ درصد افزایش در عرض روزنه داشته است (جدول ۸). در تأیید مطالعات گذشته، نتایج مطالعه حاضر نیز نشان‌دهنده تناوب در خصوصیات روزنه‌ای در محیط‌هایی با شدت-های نوری متفاوت بود. هم‌چنین نتایج مطالعه حاضر نشان‌دهنده یک افزایش تدریجی در عرض منفذ روزنه با افزایش شدت نور بود که این افزایش در گشودگی دهانه روزنه منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی برگ در گیاهان می‌شود (۱۴). درحالی‌که با کاهش شدت نور گشودگی دهانه روزنه نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه هدایت روزنه-ای و در نهایت جذب دی‌اکسیدکربن محدودشده و در نتیجه فتوسنتز گیاهان نیز کاهش می‌یابد (۱۳). تغییر در خصوصیات روزنه‌ای منجر به ایجاد تغییر در کارایی مصرف آب در گیاهان می‌شود (۸). در مطالعه حاضر، کارایی مصرف آب با افزایش شدت نور نیز افزایش یافت که بیانگر نقش تعیین‌کننده شدت نور و روزنه‌ها در به‌دست‌آمدن کارایی مصرف آب بالاتر است.

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش شدت نور، میزان آب مصرفی و تبخیر- تعرق در کاهو افزایش پیدا می‌کند. با افزایش شدت نور کارایی مصرف آب روند صعودی را نشان داد. وزن خشک در تیمار T4 بیش‌تر بوده است و کارایی مصرف آب در T4 بیش‌ترین بوده است اما بین

تیمار T3 و T4 تفاوتی وجود ندارد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، بهترین تیمار شدت نور ۳۰۰ (T3) $\mu mol.m^{-2}.S^{-1}$ بود که در آن بیشینه وزن تر محصول کاهو با مقدار ۷۵ گرم به‌دست آمد.

منابع

۱. فتحعلیان ف، مؤذن‌زاده ر و نوری‌امامزاده‌ای م (۱۳۸۸) ارزیابی و برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مراحل مختلف رشد. علوم آب و خاک. ۲۳(۴): ۲۷-۱۶.

۲. رحیمی‌خوب ع، ستوده‌نیا ع و مساح‌بوانی ع (۱۳۹۳). واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه ای منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۱): ۱۱۵-۱۰۸.

3. Aliniaeifard S and van Meeteren U (2016) Stomatal characteristics and desiccation response of leaves of cut chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*) flowers grown at high air humidity. *Scientia Horticulturae* 205: 84-89.
4. Bozkurt S and Bozkurt G (2011) The effects of drip line depths and irrigation levels on yield, quality and water use characteristics of lettuce under greenhouse condition. *African Biotechnology* 10: 3370-3379.
5. Centritto M, Loreto F, Massacci A, Pietrini F, Villani MC and Zacchini M (2000) Improved growth and water use efficiency of cherry saplings under reduced light intensity. *Ecological Research* 15: 385-392.
6. Fan X-X, Xu Z-G, Liu X-Y, Tang C-M, Wang L-W and Han X-L (2013) Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. Scientia Horticulturae 153: 50-55.
7. Givnish TJ, Montgomery RA and Goldstein G (2004a) Adaptive radiation of photosynthetic physiology in the *Hawaiian lobeliads*: light regimes, static light responses, and whole-plant compensation points. American Botany 91(2): 228-246.
8. Hattori T, Sonobe K, Inanaga S, Tsuji W, Araki AEand Morita S (2007) Short term stomatal responses to light intensity changes and osmotic stress in sorghum seedlings raised with and without silicon. *Environmental and Experimental Botany* 60 (2): 177-182.
9. Heo J, Lee C, Chakrabarty D and Paek K (2002) Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation* 38(3): 225-230.
10. Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W and Harbinson J (2010) Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Experimental Botany* 61(11): 3107-3117.
11. Kang HJ, KrishnaKumar S, Atulba SL, Jeong BR and Hwang SJ (2013) Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory. Horticulture, Environment and Biotechnology. 54(6): 501-509.
12. Knight SL and Mitchell CA (1988) Effects of CO_2 and photosynthetic photon flux on yield, gas exchange and growth rate of *Lactuca sativa* 'Waldmanns Green'. *Experimental Botany* 39: 317-328.
13. Lawson T, Von Caemmerer S and Baroli I (2010) Photosynthesis and stomatal behaviour. *In Progress in Botany* 72: 265-304.
14. Lee S-H, Tewari RK, Hahn E-Jand Paek K-Y (2007a) Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal. plantlets. *Plant Cell. Tissue and Organ Culture* 90(2): 141-151.
15. Lichtenthaler HK and Rinderle U (2007) The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry* 19: 29-85.
16. Lin K-H, Huang M-Y, Huang W-D, Hsu M-H, Yang Z-W and 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). Scientia Horticulturae. 150: 86-91.
17. McNellis TW and Deng X-W (1995) Light control of seedling morphogenetic pattern. *The Plant Cell* 7(11): 1749-1761.
18. Paiva ÉA, Isaias RM, Vale FHand Queiroz CG (2003) The influence of light intensity on anatomical structure and pigment contents of *Tradescantia pallida* (Rose) Hunt purpurea Boom (*Commelinaceae*) leaves. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 46: 617-624.

19. Pallardy SGand Kozlowski TT (1979) Stomatal Response of Populus Clones to Light Intensity and Vapor Pressure Deficit. *Plant Physiology* 64: 112-114.
20. Quail PH (2002) Phytochrome photosensory signalling networks. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 3(2): 85-93.
21. Savvides A, Fanourakis D and van Ieperen W (2012) Co-ordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *Experimental Botany* 63(3): 1135-1143.
22. Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25: 189-207.
23. Tibbits TW, Morgan DC and Warrington IJ (1983) Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide, and tungsten halogen lamps at equal PPFD. *Horticulture Science* 108: 622-630.
24. Wang J, Lu W, Tong Y and Yang Q (2016) Leaf Morphology, Photosynthetic Performance, Chlorophyll Fluorescence, Stomatal Development of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Exposed to Different Ratios of Red Light to Blue Light. *Frontiers in Plant Science* 7, article 250.
25. Weiguo F, Pingping L, Yanyou W and Jianjian T (2018) Effects of different light intensities on anti-oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Horticulture Science* 39: 129-134.
26. Wu D-X, Wang G-X, Bai, Y-F and Liao J-X (2004) Effects of elevated CO_2 concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 493-507.
27. Zavala J and Ravetta D (2001) Allocation of photoassimilates to biomass, resin and carbohydrates in Grindelia chiloensis as affected by light intensity. *Field Crops Research* 69(2): 143-149.