

مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۰۶۳۲ - ۲۷۱۷، شاپای الکترونیکی: ۹۸۰۴ - ۲۷۱۶

اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه تابستانه (*Satureja hortensis* L.) با رویکرد ایمنی زیستی در شرایط کشت کنترل شده

نوع مقاله: پژوهشی

زهره رفیعی^۱، سید احمد سادات نوری^{۱*}، سید محمد مهدی مرتضویان^۱، حسین رامشینی^۱،
هادی کلانتری خلیل آباد^۲

۱. گروه زراعی و اصلاح نباتات، دانشکدگان فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. گروه بیوتکنولوژی، پژوهشکده گیاهان دارویی، جهاد دانشگاهی

noori@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

صفحه ۸۲-۶۳

چکیده

مرزه تابستانه گیاهی دارویی است که رشد و تولید زیست توده آن تحت تأثیر شرایط نوری قرار می گیرد. این پژوهش با هدف بررسی اثر شدت نور، نور قرمز دور و اکوتیپ بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ ایرانی مرزه تابستانه (برگ پهن و اصفهانی) در شرایط کنترل شده انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه فاکتور شامل اکوتیپ، شدت نور در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه و حضور یا عدم حضور نور قرمز دور اجرا شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شدت نور مهم ترین عامل مؤثر بر صفات مورد بررسی بود و بر ارتفاع گیاه، تعداد برگ و شاخه های جانبی، قطر ساقه، زیست توده، طول ریشه، سطح برگ، کلروفیل a و RWC اثر معنی داری داشت. نور قرمز دور و اکوتیپ نیز بر برخی صفات اثر معنی دار نشان دادند. اکوتیپ برگ پهن در بیشتر صفات میانگین بالاتری نسبت به اصفهانی داشت. بیشتر برهم کنش های دو گانه و سه گانه معنی دار نبودند و اثر متقابل شدت نور و نور قرمز دور تنها برای برخی صفات از جمله سطح برگ و قطر ساقه معنی دار شد. شدت ۲۰۰ میکرومول بیشترین مقادیر بسیاری از صفات رشد را ایجاد کرد. شدت نور عامل اصلی تعیین کننده رشد مرزه تابستانه بود.

واژه های کلیدی: شدت نور، صفات مورفولوژیک، طیف نور LED، مرزه تابستانه

مقدمه

مرزه تابستانه با نام علمی *Satureja hortensis* L. گیاهی دارویی یک‌ساله از خانواده نعنائیان (Lamiaceae) است که به دلیل خواص دارویی متنوع خود از جمله اثرات ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی، ضد قارچی و ضد التهابی شناخته می‌شود (Adiguzel *et al.*, 2007; Wesolowska *et al.*, 2015). همچنین، این گیاه خاصیت ضد اسپاسم دارد و می‌تواند دردهای ناشی از گرفتگی عضلات و قاعدگی را تسکین دهد. در طب سنتی، از دم‌کرده آن برای درمان اسهال، تهوع و گلودرد استفاده می‌شود (Hajhashemi *et al.*, 2000). علاوه بر این، مرزه به دلیل طبع گرم و خشک خود، در کاهش بلغم و رفع سستی بدن مؤثر است و به عنوان یک چاشنی در غذاها استفاده شود. ارزش درمانی این گیاه عمدتاً به ترکیبات اسانس آن نسبت داده می‌شود که تیمول و پیش‌سازهای آن به عنوان کلیدی‌ترین ترکیبات فعال زیستی مطرح هستند (Hashim *et al.*, 2021). افزایش تقاضای جهانی برای ترکیبات طبیعی و ایمن، مرزه تابستانه را به گزینه‌ای ارزشمند برای صنایع دارویی و غذایی تبدیل کرده است (Fierascu *et al.*, 2018; Ejaz *et al.*, 2023).

با این حال، تولید گیاهان دارویی با کیفیت بالا و دارای مقادیر یکسان متابولیت‌های ثانویه با چالش‌های قابل توجهی مواجه است. کشت در فضای باز اغلب تحت تأثیر تنش‌های غیرقابل کنترل محیطی و محدودیت‌های فصلی قرار دارد که می‌تواند هم بر عملکرد زیست‌توده و هم بر غلظت ترکیبات فیتوشیمیایی تأثیر منفی بگذارد (Ncube *et al.*, 2012). بنابراین، توسعه سیستم‌های کشت در محیط کنترل‌شده مانند گلخانه‌های مدرن یا مزارع عمودی، راه‌حلی امیدوارکننده برای تولید در تمام فصول سال

همراه با بهینه‌سازی رشد و تجمع متابولیت‌ها فراهم می‌کند (Dsouza *et al.*, 2025).

نور به عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای محیطی، از طریق شبکه‌های سیگنال‌دهی نوری نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم فرایندهای فتومورفوز، توسعه اندام‌های رویشی و تجمع زیست‌توده در گیاهان دارد (Paradiso and Proietti, 2022). گیاهان دارویی تیره نعنائیان (Lamiaceae)، از جمله مرزه تابستانه، دستکاری کیفیت و شدت نور (مانند استفاده از نسبت‌های مختلف طیف‌های قرمز و آبی) می‌تواند به عنوان یک محرک (Elicitor) کارآمد برای هدایت پلاستیسیته فنوتیپی و بهبود صفات مورفولوژیک عمل کند (Pennisi *et al.*, 2020). با این وجود، به دلیل تنوع ژنتیکی بالا و تاریخچه سازگاری‌های بومی در زیستگاه‌های مختلف، اکوتیپ‌های گوناگون این گونه گیاهی، پاسخ‌های مورفولوژیک و رشدی کاملاً متمایزی از خود بروز می‌دهند (Hadian *et al.*, 2008). بر این اساس، ارزیابی دقیق برهم‌کنش اکوتیپ و محیط (G×E) در اکوتیپ‌های مختلف مرزه تابستانه تحت شرایط نوری متغیر، برای درک مکانیسم‌های سازگاری و بهینه‌سازی تولید در سیستم‌های کشت کنترل‌شده ضروری است (Massa *et al.*, 2008).

نور یک عامل محیطی حیاتی است که نه تنها به عنوان منبع انرژی برای فتوسنتز عمل می‌کند، بلکه به عنوان یک مولکول پیام‌رسان قوی، رشد گیاه و متابولیسم ثانویه را از طریق فوتومورفوز تنظیم می‌نماید (Humbal and Pathak, 2023). ظهور دیویدهای نشر نور (LED) انقلابی در کشاورزی محیط کنترل‌شده ایجاد کرده است و امکان تنظیم دقیق کیفیت نور (طیف)، شدت نور (چگالی شار فوتون فتوسنتزی) و فتوپریود را فراهم می‌سازد (Ghobadi *et al.*, 2016). در میان

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

توجه قرار گرفته است که این امر ضرورت انجام پژوهش حاضر را برجسته می‌سازد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشد

بذرهای دو اکوتیپ ایرانی مرزه تابستانه شامل اکوتیپ‌های «اصفهانی» و «برگ‌پهن» از شرکت پوپونیک تهران تهیه شدند. بذرهای ابتدا در سینی‌های نشا حاوی بستر کشت متشکل از کوکوپیت و پرلیت کشت شدند و تا زمان ظهور برگ‌های حقیقی تحت آبیاری منظم قرار گرفتند. پس از رسیدن نشاها به مرحله چهاربرگی، بوته‌ها به گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر، حاوی مخلوط کوکوپیت و پرلیت با نسبت حجمی ۱:۲، منتقل شدند. آزمایش در اتاقک رشد تحت شرایط کنترل شده شامل دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد در روز و 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد در شب و رطوبت نسبی 60 ± 5 درصد انجام شد. آبیاری و تغذیه گیاهان هر سه روز یکبار با محلول غذایی هوگلند با غلظت نصف انجام گرفت. تیمارهای نوری از زمان انتقال نشاهای چهاربرگی، ۲۱ روز پس از کاشت بذر، آغاز شد و تا پایان دوره رشد رویشی در روز ۷۰ پس از کاشت، به مدت هفت هفته، ادامه یافت.

تیمارهای نوری و طرح آزمایشی

تیمارهای نوری با استفاده از سامانه LED رشد گیاه انجام شد. طیف پایه نور شامل ۷۰ درصد نور قرمز با پیک طیفی ۶۶۰ نانومتر و ۳۰ درصد نور آبی با پیک طیفی ۴۵۵ نانومتر بود. نور قرمز دور (Far-Red, FR) با استفاده از دیودهای LED با طول موج ۷۳۰ نانومتر به صورت هم‌زمان با دوره روشنایی ۱۶ ساعته اعمال شد.

طیف‌های مختلف نوری، طول موج‌های قرمز (۶۶۰ نانومتر) و آبی (۴۵۵ نانومتر) به دلیل کارایی بالای فوتون فتوسنتزی و نقش تنظیمی در بیان ژن‌های مرتبط با بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه، مؤثرترین هستند (Terashima et al., 2009; Choi et al., 2017). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نسبت‌های مشخص قرمز به آبی می‌توانند تجمع ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، آنتوسیانین‌ها و اسانس را در گیاهان دارویی مختلف از جمله آویشن و ریحان به طور معنی‌داری افزایش دهند (Tohidi et al., 2020; Ali and Tong, 2023; Sheikhi et al., 2024).

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اعمال طیف‌ها و شدت‌های مختلف نوری، تغییرات چشمگیری در صفات مورفولوژیک گیاهان تیره نعناعیان (Lamiaceae) ایجاد می‌کند؛ با این حال، شدت این تغییرات کاملاً وابسته به اکوتیپ گیاه است. به عنوان مثال، داو و همکاران (Dou et al., 2018) در بررسی ارقام مختلف ریحان (*Ocimum basilicum*) گزارش دادند که افزایش شدت نور به طور معنی‌داری باعث افزایش زیست‌توده، ضخامت ساقه و تعداد برگ‌ها می‌شود، اما میزان این پاسخ مورفولوژیک در ارقام مختلف، متفاوت است. در پژوهشی دیگر، سلوکی و همکاران (Solouki et al., 2023) نشان دادند که استفاده از نسبت‌های مختلف نورهای ال‌ای‌دی (LED) قرمز و آبی، تاثیر مستقیمی بر ارتفاع گیاه، سطح برگ و توسعه اندام‌های هوایی دارد. همچنین، سعیدی و همکاران (Saeedi et al., 2024) با بررسی گونه‌های مختلف دارویی ثابت کردند که واکنش گیاهان به طیف‌های نوری کاملاً اختصاصی گونه و حتی اکوتیپ است و نمی‌توان یک فرمول نوری یکسان را برای تمامی گیاهان این خانواده تجویز کرد. با وجود این یافته‌ها، بررسی دقیق اثر متقابل شدت و طیف نور بر شاخص‌های مورفولوژیک در اکوتیپ‌های بومی مرزه تابستانه تاکنون کمتر مورد

شد. شدت نور با استفاده از پارمتر کالیبره Li-COR 190R (USA) اندازه گیری و تنظیم شد.

اندازه گیری صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک

در این پژوهش، صفات اندازه گیری شده بر اساس ماهیت شاخص مورد بررسی به دو گروه صفات مورفولوژیک شامل صفات رشدی، معماری اندام هوایی و ریشه و صفات فیزیولوژیک شامل محتوای نسبی آب برگ (Relative Water Content, RWC) و کلروفیل a تقسیم شدند. در پایان دوره اعمال تیمارهای نوری، صفات مورفولوژیک گیاهان اندازه گیری شدند. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع گیاه، تعداد برگ، تعداد شاخه های جانبی، قطر ساقه، سطح برگ، طول ریشه، وزن تر و خشک شاخساره و وزن تر و خشک ریشه بود.

ارتفاع گیاه از سطح بستر کشت تا انتهای بلندترین بخش شاخساره با استفاده از خط کش مدرج بر حسب سانتی متر اندازه گیری شد. تعداد برگ و تعداد شاخه های جانبی به صورت شمارش مستقیم ثبت شدند. قطر ساقه در قسمت مشخصی از ساقه با استفاده از کولیس اندازه گیری شد. برای تعیین وزن تر شاخساره و ریشه، پس از برداشت گیاهان، شاخساره از ریشه جدا شد و وزن تر هر بخش به صورت جداگانه با ترازوی دقیق اندازه گیری شد. ریشه ها پس از جداسازی از بستر کشت، به آرامی شست و شو داده شدند تا بقایای بستر از سطح آنها حذف شود و سپس وزن تر ریشه ثبت شد. برای تعیین وزن خشک، نمونه های شاخساره و ریشه پس از اندازه گیری وزن تر، در شرایط خشک کردن مناسب تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و سپس وزن خشک آنها ثبت شد. طول ریشه پس از خارج کردن ریشه از بستر کشت، از محل طوقه تا انتهای بلندترین ریشه اندازه گیری و بر حسب سانتی متر گزارش شد.

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی (Randomized Complete Block Design, RCDB) با سه فاکتور شامل اکوتیپ، شدت نور و نور قرمز دور انجام شد. اکوتیپ در دو سطح شامل اصفهانی و برگ پهن، شدت نور در سه سطح شامل ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه و نور قرمز دور در دو سطح شامل حضور و عدم حضور نور قرمز دور در نظر گرفته شد. آزمایش در سه تکرار انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل ۱۰ گلدان پلاستیکی بود و در هر گلدان سه بوته مرزه کشت شد. بنابراین، در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی شامل ۲ اکوتیپ $\times$ ۳ سطح شدت نور $\times$ ۲ سطح نور قرمز دور در ۳ تکرار مورد بررسی قرار گرفت.

اعمال شدت و کیفیت نور

در تیمارهای دارای FR، شدت نور قرمز دور به گونه ای تنظیم شد که نسبت فوتون های قرمز (R) به قرمز دور (R/FR) برابر با ۱/۲ باشد. شدت FR در این تیمارها حدود ۳۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه بود. در تیمارهای فاقد FR، نسبت R/FR بیشتر از ۱۰ بود.

شدت نور فتوسنتزی بر اساس چگالی شار فوتون فتوسنتزی (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه تنظیم شد. شدت نور در سطح تاج پوش گیاهان اندازه گیری و تنظیم گردید. در تیمارهای دارای FR، فوتون های ۷۳۰ نانومتر در محاسبه PPFD نور زمینه لحاظ نشدند.

فاصله منبع نور تا تاج پوش گیاهان در طول آزمایش حدود ۳۵ سانتی متر حفظ شد. یکنواختی توزیع نور در سطح بستر آزمایشی بیش از ۹۲ درصد بود که با چیدمان متراکم LEDها تأمین

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از آزمایش پس از بررسی و آماده‌سازی، با استفاده از تجزیه واریانس فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی مورد تجزیه آماری قرار گرفتند. عوامل مورد بررسی شامل اکوتیپ، شدت نور، نور قرمز دور و برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بودند.

معنی‌داری اثرات اصلی و برهم‌کنش عوامل بر اساس آزمون F در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد ارزیابی شد. در مواردی که اثر شدت نور، به‌عنوان عامل سه‌سطحی، معنی‌دار بود، مقایسه میانگین سطوح شدت نور با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای عوامل دو سطحی شامل اکوتیپ و نور قرمز دور، مقایسه سطوح بر اساس آزمون F انجام شد و نیازی به مقایسه چندگانه میانگین‌ها نبود.

نتایج

بررسی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل «شدت نور × نور قرمز دور» در صفات سطح برگ و قطر ساقه در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود ($p < 0.05$) و بر سایر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک اثر معنی‌داری نداشت. همچنین، اثرات متقابل دوگانه «شدت نور × اکوتیپ»، «نور قرمز دور × اکوتیپ» و اثر متقابل سه‌گانه «شدت نور × نور قرمز دور × اکوتیپ» بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مورد بررسی از نظر آماری غیرمعنی‌دار بود.

بنابراین، تفسیر داده‌ها صرفاً بر اساس اثرات اصلی فاکتورها انجام شد. در مورد قطر ساقه، شدت نور و نور قرمز دور به ترتیب در سطوح معنی‌داری ۱ و ۵ درصد اثرگذار بودند. ارتفاع گیاه نیز تحت تأثیر شدت نور به شکل بسیار معنی‌دار ($F^{**}=450.997$) قرار گرفت، در حالی که نور قرمز دور و اکوتیپ

سطح برگ در پایان دوره آزمایش با استفاده از دستگاه سطح‌برگ‌سنج UK, Delta-T اندازه‌گیری شد. برای این منظور، برگ‌های برداشت‌شده از هر واحد آزمایشی به‌صورت جداگانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و سطح برگ بر حسب میلی‌متر مربع (mm^2) گزارش شد. غلظت کلروفیل a به روش آرنون (۱۹۴۹) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برگ پس از برداشت و آماده‌سازی، برای استخراج رنگیزه‌های فتوسنتزی مورد استفاده قرار گرفتند و مقدار کلروفیل a بر اساس روش مذکور محاسبه شد. غلظت کلروفیل a بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر ($\text{mg g}^{-1} \text{FW}$) بیان شد.

محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان شاخص وضعیت آب گیاه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته و سالم در پایان دوره اعمال تیمارها برداشت و بلافاصله وزن تر اولیه (Fresh Weight, FW) آن‌ها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های برگ در ظروف حاوی آب دیونیزه قرار داده شده و به‌مدت ۲۴ ساعت در تاریکی نگهداری شدند تا به حالت تورژسانس کامل برسند. پس از پایان دوره آبیگری، آب اضافی سطح برگ‌ها با کاغذ صافی به‌آرامی حذف و وزن تورژسانس (Turgid Weight, TW) ثبت شد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند و پس از رسیدن به وزن ثابت، وزن خشک (Dry Weight, DW) اندازه‌گیری شد. مقدار RWC با استفاده از رابطه استاندارد زیر محاسبه گردید:

$$RWC(\%) = \frac{TW - DW}{FW - DE} * 100$$

که در آن FW نشان‌دهنده وزن تر اولیه، TW وزن نمونه در حالت تورژسانس کامل و DW وزن خشک نمونه است. روش اندازه‌گیری با استفاده از روش گزارش‌شده برای مرزه تابستانه توسط (Rasouli et al., 2023) تنظیم شد.

تأثیر معنی داری در سطوح ۵ و ۱ درصد داشتند. وزن تر برگ و وزن خشک برگ بیشتر به شدت نور و اکوتیپ وابسته بودند و اثر نور قرمز دور نیز معنی دار گزارش شد. این نتایج نشان می دهد که تغییر شدت نور و تفاوت در اکوتیپ و نور قرمز دور به طور قابل توجهی بر رشد و صفات مورفولوژیک گیاه اثر می گذارند. به طور کلی، می توان گفت که شدت نور مهم ترین عامل مؤثر بر صفات مورفولوژیک بوده و تفاوت های ژنتیکی (اکوتیپ) و

تأثیر معنی داری در سطوح ۵ و ۱ درصد داشتند. وزن تر برگ و وزن خشک برگ بیشتر به شدت نور و اکوتیپ وابسته بودند و اثر نور قرمز دور نیز معنی دار گزارش شد. این نتایج نشان می دهد که تغییر شدت نور و تفاوت در اکوتیپ و نور قرمز دور به طور قابل توجهی بر رشد و صفات مورفولوژیک گیاه اثر می گذارند. به طور کلی، می توان گفت که شدت نور مهم ترین عامل مؤثر بر صفات مورفولوژیک بوده و تفاوت های ژنتیکی (اکوتیپ) و

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرزه تابستانه. (MS) میانگین مربعات، (ns) غیرمعنی دار؛ * و ** به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند

صفات	درجه	وزن تر	وزن خشک	طول ریشه	سطح برگ	کلروفیل a	RWC
منابع تغییر	آزادی	ریشه	ریشه	(MS)	(MS)	(MS)	(MS)
				(MS)			
بلوک	۲	۲/۰۸۷**	۰/۳۱۵**	۶۶/۷۷۸*	۱۶۰/۱۶۰	۰/۹۵۸	۱۰/۷۲۰*
شدت نور	۲	۱/۸۴۵*	۰/۶۳۳**	۲۵۵/۹۳**	۹۶۴/۶۶**	۱/۴۲۸**	۲۷۴/۴۷**
نور قرمز دور	۱	۳/۷۹۰**	۰/۰۹۶**	۰/۲۱۸ ^{ns}	۷۹۶/۹۳**	۱/۴۷۶**	۳۳/۶۴۰**
اکوتیپ	۱	۲/۳۲۱*	۰/۱۱۶**	۱۱۲/۳۶**	۳۳۹/۶۶۵*	۰/۵۱۸**	۵۲/۸۰۴**
شدت نور* نور قرمز دور	۲	۰/۴۲۱ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۸/۴۷۰ ^{ns}	۲۱۲/۰۲۶*	۰/۲۷۱ ^{ns}	۱/۹۰۸ ^{ns}
شدت نور* اکوتیپ	۲	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۳/۵۱۶ ^{ns}	۳/۱۴۶ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱/۳۹۵ ^{ns}
نور قرمز دور* اکوتیپ	۱	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱/۶۰۴ ^{ns}	۴۳/۶۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۲۱۸ ^{ns}
شدت نور* نور قرمز دور* اکوتیپ	۲	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۲/۹۵۴ ^{ns}	۱۱/۹۴۰ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۱/۳۰۴ ^{ns}
اشتباه آزمایشی	۲۲	۰/۳۱۵	۰/۰۰۹	۱۱/۰۶۴	۴۸/۰۳۵	۰/۱۰۸	۳/۵۹۴
ضریب تغییرات (CV%)		۲۳/۶۴	۱۲/۲۲	۱۲/۱۷	۲۱/۹۶	۲۲/۲۹	۲/۶۶

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

ادامه جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرزه تابستانه

صفات منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد ساقه فرعی (MS)	تعداد برگ (MS)	قطر ساقه (MS)	ارتفاع گیاه (MS)	وزن تر برگ (MS)	وزن خشک برگ (MS)	وزن تر ساقه (MS)	وزن خشک ساقه (MS)
بلوک	۲	۵/۵۳ ^{NS}	۲۷۹۷	۰/۶۳۳	۱۵۱/۶۶۱ ^{NS}	۱۱/۸۴ ^{**}	۰/۵۳۱	۳۷/۹۷۰	۰/۴۳۳ [*]
شدت نور	۲	۸۳/۵۳ ^{**}	۱۹۳۰۸۱ ^{**}	۴/۲۳۷ ^{**}	۴۵۰/۹۹۷ ^{**}	۲۵/۴۹ ^{**}	۰/۴۴۴ ^{**}	۲۳/۸۱ ^{**}	۵/۴۴۰ ^{**}
نور قرمز دور	۱	۱/۷۷۸ ^{NS}	۱۰۶۲۷۶ ^{**}	۴/۱۲۸ ^{**}	۳۴۲/۸۶۷ ^{**}	۱۴/۱۴ ^{**}	۰/۸۵۶ ^{**}	۱۴/۷۹۷ [*]	۱/۴۴۸ ^{**}
اکوتیپ	۱	۳۶/۰۰ ^{**}	۵۶۰۱۱ ^{**}	۲/۵۲۳ ^{**}	۳۴۱/۶۳۴ ^{**}	۷/۳۲۶ ^{**}	۰/۸۳۱ ^{**}	۱۸/۳۱۸ [*]	۲/۳۶۱ ^{**}
شدت نور* نور قرمز دور	۲	۱/۰۲۸ ^{NS}	۱۰۸۹۰/۶ ^{NS}	۰/۹۶۱ [*]	۲۵/۶۵۴ ^{NS}	۰/۰۵۰ ^{NS}	۰/۰۲۴ ^{NS}	۰/۷۵۰ ^{NS}	۰/۰۱۳ ^{NS}
شدت نور* اکوتیپ	۲	۱/۵۸۳ ^{NS}	۲۰۶/۰ ^{NS}	۰/۱۶۷ ^{NS}	۳۵/۰۰۰ ^{NS}	۰/۶۵۵ ^{NS}	۰/۰۶۳ ^{NS}	۰/۷۰۸ ^{NS}	۰/۰۹۳ ^{NS}
نور قرمز دور* اکوتیپ	۱	۱/۰۰۰ ^{NS}	۱۱۳۴/۴ ^{NS}	۰/۰۸۳ ^{NS}	۲۲/۲۴۷ ^{NS}	۰/۶۳ ^{NS}	۰/۰۳۷ ^{NS}	۰/۰۹۸ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}
شدت نور* نور قرمز دور* اکوتیپ	۲	۱/۷۵۰ ^{NS}	۲۹۰۹/۷ ^{NS}	۰/۰۲۳ ^{NS}	۱۰/۹۶۲ ^{NS}	۰/۵۱۲ ^{NS}	۰/۰۱۲ ^{NS}	۱/۳۴۴ ^{NS}	۰/۰۵۴ ^{NS}
اشتباه آزمایشی	۲۲	۲/۰۷۳	۶۳۸۹/۹	۰/۲۷۱	۱۷/۳۱۵	۱/۰۳۶	۰/۰۴۲	۲/۴۹۸	۰/۰۷۰
ضریب تغییرات (CV%)		۸/۱۲	۱۸/۹۳	۷/۶۴	31/10	۱۹/۵۸	۱۴/۳۴	۲۰/۳۱	۱۱/۲۳

مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک

نتایج مقایسه میانگین سطوح شدت نور با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد (جدول ۲) نشان داد که شدت نور ۲۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه در بسیاری از صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مورد بررسی، بالاترین میانگین را به خود اختصاص داد. با افزایش شدت نور از ۲۰۰ به ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه، میانگین

بسیاری از صفات کاهش یافت. به عنوان مثال، ارتفاع گیاه از ۴۶/۶۳ سانتی‌متر در شدت ۲۰۰ به ۴۰/۰۶ و ۳۴/۳۸ سانتی‌متر در شدت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه کاهش یافت. تعداد برگ نیز از ۵۸/۵۵۷ برگ در شدت ۲۰۰ به ۴۰۲/۳۳ و ۳۰۶/۹۲ برگ در شدت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ کاهش نشان داد. همچنین، سطح برگ از ۴۱/۲۵ به ۲۹/۸۳ و ۲۳/۵۷ و کلروفیل a از ۱/۸۷ به ۱/۳۷ و ۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در شدت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر

مترمربع بر ثانیه کاهش یافت. حروف متفاوت در جدول ۲ نشان دهنده اختلاف معنی دار بین سطوح شدت نور بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد است.

در مورد RWC، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش شدت نور، مقدار RWC به طور معنی داری کاهش یافت؛ به طوری که میانگین آن از ۷۵/۱۵ درصد در شدت ۲۰۰ به ۷۱/۰۶ و ۶۶/۵۹ درصد به ترتیب در شدت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه کاهش پیدا کرد. حروف متفاوت در جدول ۲ نشان دهنده اختلاف معنی دار بین سطوح شدت نور بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد است. بنابراین، افزایش شدت نور در دامنه مورد بررسی با کاهش معنی دار وضعیت آب نسبی برگ همراه بود.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثرات متقابل شدت نور × اکوتیپ، نور قرمز دور × اکوتیپ و اثر متقابل سه گانه شدت نور × نور قرمز دور × اکوتیپ برای صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مورد بررسی معنی دار نبودند. همچنین، اثر متقابل شدت نور × نور قرمز دور نیز برای اغلب صفات غیرمعنی دار بود و تنها برای سطح برگ و قطر ساقه در سطح ۵ درصد معنی دار

شد. بنابراین، برای صفاتی که برهم کنش‌های مربوط به آن‌ها معنی دار نبود، تفسیر نتایج بر اساس اثرات اصلی فاکتورها انجام شد. از آنجا که شدت نور دارای سه سطح بود، مقایسه میانگین سطوح آن با آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گرفت (جدول ۲). در مقابل، اکوتیپ و نور قرمز دور هرکدام دارای دو سطح بودند و اختلاف بین سطوح این دو عامل مستقیماً بر اساس آزمون F در تجزیه واریانس ارزیابی شد و نیازی به آزمون مقایسه میانگین چندگانه نداشت. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، نور قرمز دور بر تعداد ساقه‌های جانبی و طول ریشه اثر معنی داری نداشت، اما بر تعداد برگ، قطر ساقه، ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک برگ و ساقه، وزن تر و خشک ریشه، سطح برگ، کلروفیل a و RWC اثر معنی دار داشت. همچنین، اکوتیپ بر بیشتر صفات مورد بررسی اثر معنی دار نشان داد و RWC نیز بین دو اکوتیپ تفاوت معنی داری داشت. در مقابل، معنی دار نبودن اثر اکوتیپ در برخی صفات نشان دهنده نبود اختلاف آماری بین دو اکوتیپ برای آن صفات است. در مجموع، نتایج نشان داد که شدت نور دامنه وسیع تری از تغییرات صفات مورفولوژیک را توضیح داد، در حالی که نور قرمز دور و اکوتیپ نیز به صورت مستقل بر تعدادی از صفات، از جمله RWC، اثرگذار بودند.

جدول ۲. مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرزه تابستانه در سطوح مختلف شدت نور

تیمارهای آزمایشی	تعداد ساقه	تعداد برگ	قطر ساقه	ارتفاع گیاه	وزن تر برگ	وزن خشک برگ	وزن تر ساقه	وزن خشک ساقه
شدت نور ۲۰۰	۲۰/۵۰ ^a	۵۵۷/۵۸ ^a	۷/۴۹ ^a	۴۶/۶۳ ^a	۶/۸۷ ^a	۱/۶۴ ^a	۹/۴۱ ^a	۳/۰۵ ^a
۳۰۰	۱۷/۴۲ ^b	۴۰۲/۳۳ ^b	۶/۵۵ ^b	۴۰/۰۶ ^b	۴/۴۸ ^b	۱/۳۵ ^b	۷/۰۹ ^b	۲/۳۰ ^b
۴۰۰	۱۵/۲۵ ^c	۳۰۶/۹۲ ^c	۶/۳۹ ^b	۳۴/۳۸ ^c	۴/۲۳ ^b	۱/۲۸ ^b	۶/۸۵ ^b	۱/۷۱ ^c

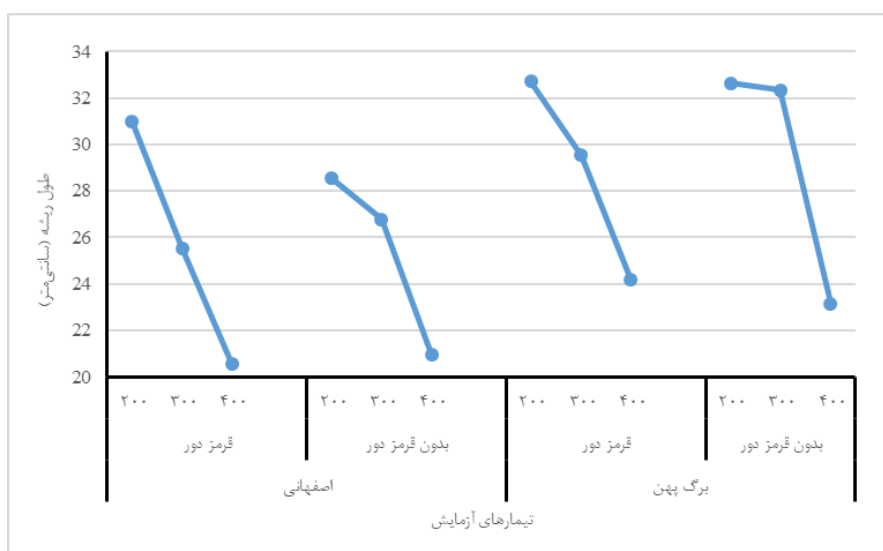
میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند؛ میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند.

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

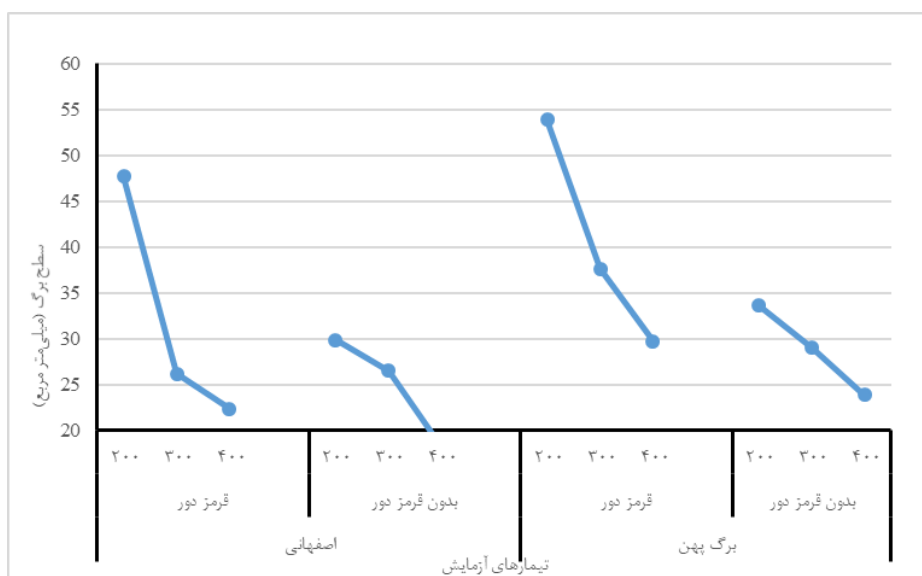
ادامه جدول ۲. مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرزه تابستانه در سطوح مختلف شدت نور

تیمارهای آزمایشی	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	طول ریشه	سطح برگ	کلروفیل a	RWC
شدت نور ۲۰۰	۲/۷۷ ^a	۰/۹۹ ^a	۳۱/۲۱ ^a	۴۱/۲۵ ^a	۱/۸۷ ^a	۷۶/۱۵ ^a
۳۰۰	۲/۳۵ ^{ab}	۰/۷۶ ^b	۲۸/۵۴ ^a	۲۹/۸۳ ^b	۱/۳۷ ^b	۷۱/۰۶ ^b
۴۰۰	۱/۹۹ ^b	۰/۵۳ ^c	۲۲/۲۳ ^b	۲۳/۵۷ ^c	۱/۲۰ ^b	۶۶/۵۹ ^c

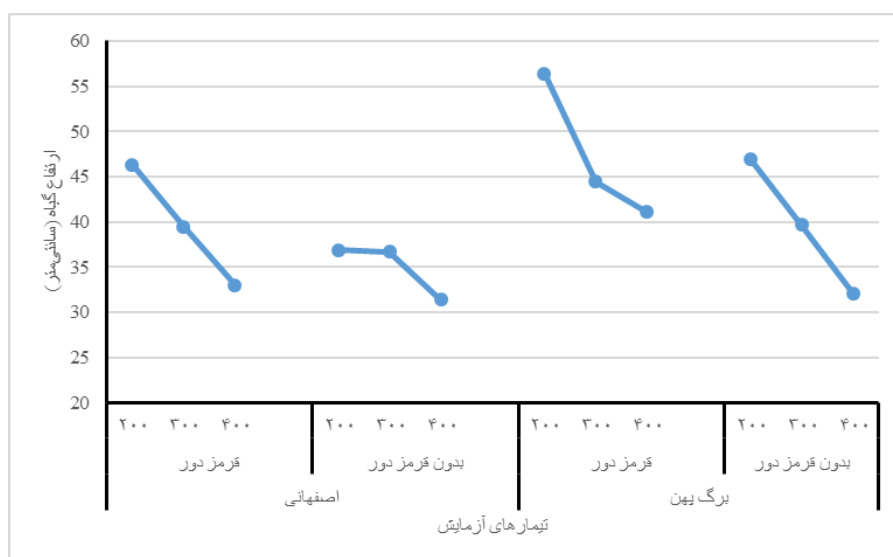
میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند؛ میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.



شکل ۱. مقایسه طول ریشه در تیمارهای مختلف نوری. کاهش طول ریشه در اثر شدت نور برای هر دو رقم و در هر دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز دور دیده می‌شود.

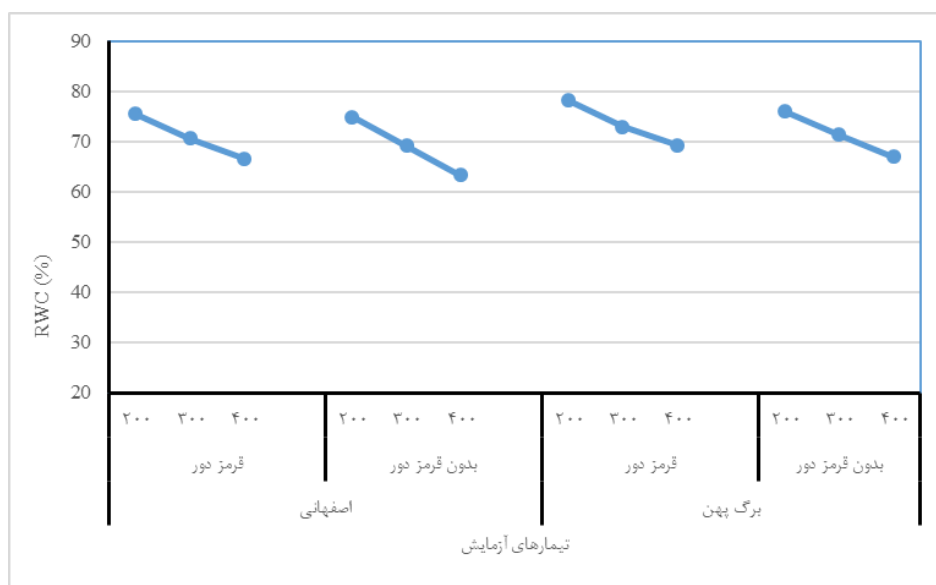


شکل ۲. مقایسه سطح برگ در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز

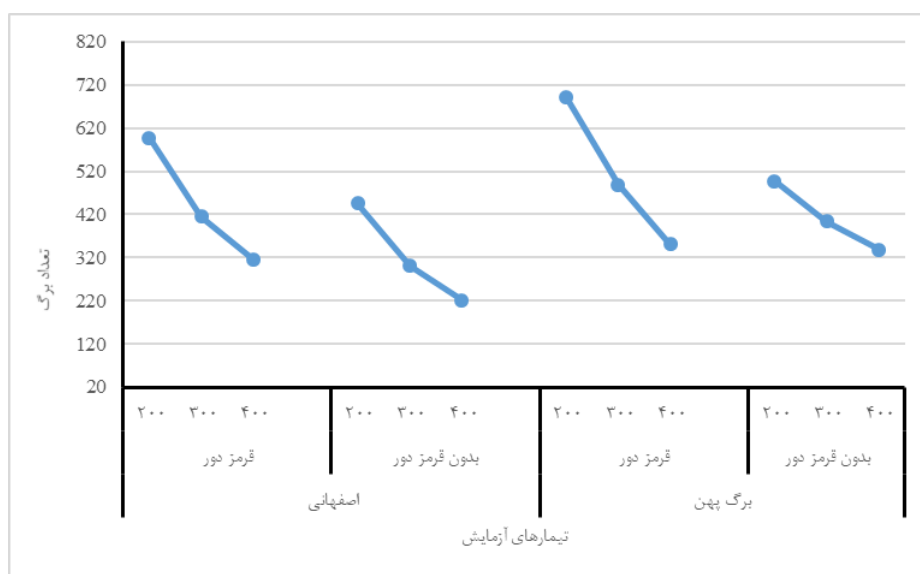


شکل ۳. مقایسه ارتفاع گیاه در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز

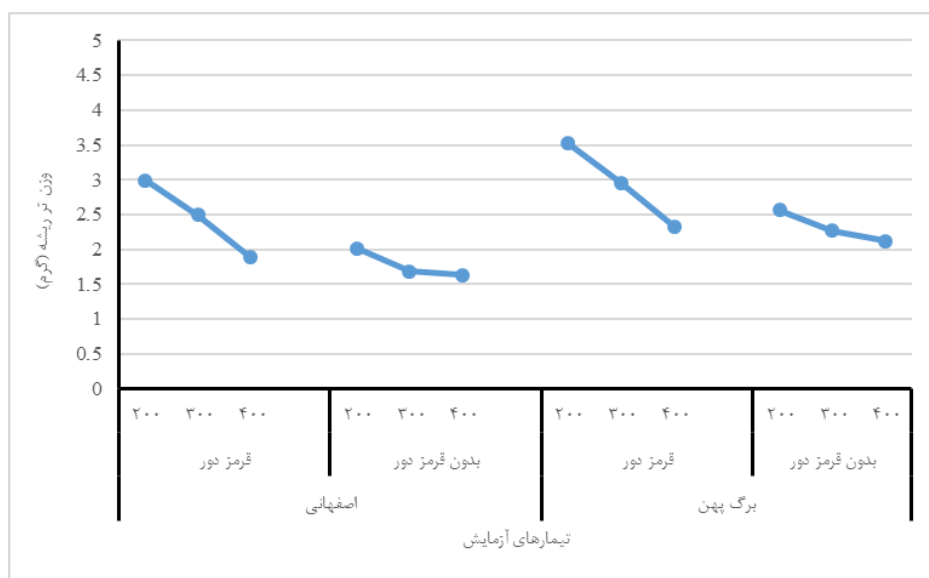
"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."



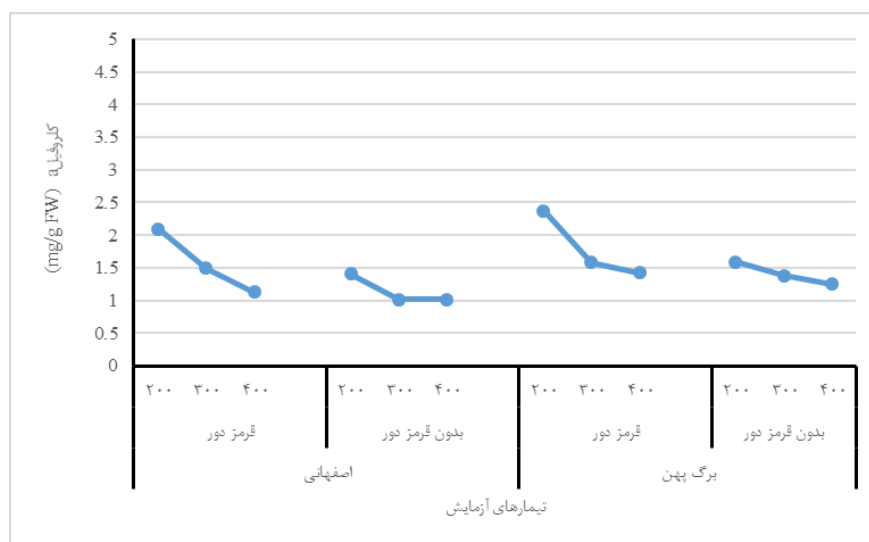
شکل ۴. مقایسه درصد RWC در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز



شکل ۵. مقایسه تعداد برگ در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز



شکل ۶. مقایسه وزن تر ریشه در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز



شکل ۷. مقایسه کلروفیل a در تیمارهای مختلف نوری در دو رقم برگ پهن و اصفهانی در دو حالت حضور و عدم حضور نور قرمز

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

بحث

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط کشت کنترل شده، شدت نور (PPFD) مهم ترین عامل مؤثر بر تغییرات صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و رشد رویشی مرزه تابستانه در دامنه شرایط مورد مطالعه بود، در حالی که نور قرمز دور و تفاوت بین اکوتیپ ها نیز برای تعدادی از صفات اثر معنی دار داشتند. نکته قابل توجه آن است که برهم کنش شدت نور $\times$ اکوتیپ و نور قرمز دور $\times$ اکوتیپ برای صفات مورد بررسی معنی دار نبود و برهم کنش شدت نور با نور قرمز دور تنها برای سطح برگ و قطر ساقه معنی دار شد و برای سایر صفات مورد بررسی معنی دار نبود. بنابراین، نتایج حاصل از تجزیه واریانس از وجود یک پاسخ گسترده و پیچیده ناشی از برهم کنش شدت و کیفیت طیفی نور حمایت نمی کند، بلکه نشان می دهد که در شرایط آزمایش حاضر، شدت نور عمدتاً به عنوان عامل اصلی و نور قرمز دور و اکوتیپ به عنوان عوامل مؤثر بر برخی صفات، الگوی رشد گیاه را تعیین کردند. در این میان، افزایش شدت نور از ۲۰۰ به ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه با کاهش معنی دار بسیاری از صفات رشدی همراه شد. از این رو، مهم ترین یافته پژوهش حاضر را می توان در تعیین دامنه شدت نور مناسب برای رشد رویشی مرزه در شرایط کنترل شده و در کنار شناسایی اثرات مستقل نور قرمز دور و تفاوت بین اکوتیپ ها دانست، نه در کشف یک الگوی پیچیده از برهم کنش های طیفی.

این نتیجه با گزارش خلیقی و همکاران (۲۰۲۱) درباره مرزه تابستانه که نشان دادند شدت نور می تواند به طور معنی داری صفات مورفوفیزیولوژیک و تولید اسانس این گیاه را تغییر دهد، در جهت اهمیت بالای شدت نور برای رشد این گونه همخوانی دارد. همچنین، یافته حاضر با مطالعات انجام شده روی سایر گیاهان دارویی و معطر در سامانه های کشت کنترل شده مطابقت دارد که

نشان داده اند پاسخ رشد به شدت و کیفیت نور به گونه، مرحله رشد و زمینه طیفی نور وابسته است (Hashim et al., 2021; Paradiso and Proietti, 2022) برای مثال در *Scrophularia kakudensis* تغییر کیفیت نور LED موجب تغییر معنی دار طول ساقه، قطر ساقه، رشد ریشه و وزن تر و خشک گیاه شد و پاسخ صفات مختلف به نور قرمز و آبی یکسان نبود (Lobiuc et al., 2017). این موضوع نشان می دهد که افزایش مقدار نور به تنهایی الزاماً به بیشینه شدن تمام مؤلفه های رشد منجر نمی شود و نوع پاسخ می تواند به ویژگی های فیزیولوژیک و ژنتیکی گیاه وابسته باشد (Dou et al., 2020; Pennisi et al., 2018). با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر برهم کنش اغلب عوامل نوری معنی دار نبود، یافته های حاضر بیشتر بر نقش غالب شدت نور در مقایسه با اثرات تعاملی طیف و شدت تأکید دارند.

کاهش شدید ارتفاع گیاه از ۴۶/۶۳ سانتی متر در شدت ۲۰۰ به ۳۴/۳۸ سانتی متر در شدت ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه، همراه با کاهش تعداد برگ و سطح برگ، نشان داد که افزایش شدت نور در محدوده مورد بررسی با تغییر در معماری اندام هوایی مرزه همراه بود. این الگو با نتایج برخی مطالعات روی گیاهان دارویی و زراعی در محیط های کنترل شده مطابقت دارد (Paradiso and Proietti, 2022)، اگرچه جهت و شدت پاسخ در گونه های مختلف یکسان نیست. برای نمونه، در گیاه دارویی *Nepeta nuda*، شدت و کیفیت نور آبی-قرمز موجب تغییر هم زمان سطح برگ، ضخامت مزوفیل و زیست توده شد و تیمارهای نوری با شدت متفاوت، پاسخ های متفاوتی در ارتفاع و توسعه سطح برگ ایجاد کردند (Zhiponova et al., 2025). به طور کلی، این یافته ها نشان می دهند که پاسخ مورفولوژیک گیاه به محیط نوری می تواند حاصل تغییر در مقدار انرژی دریافتی و تنظیم فرآیندهای رشد باشد و

فتوسنتزی در مرزه با افزایش شدت نور الزاماً افزایشی نیست. کاهش غلظت برخی رنگیزه‌ها در شرایط شدت نور بالا در مطالعات مختلف گزارش شده است (Dou et al., 2018; Pennisi et al., 2020)، هرچند پاسخ رنگیزه‌های فتوسنتزی به شدت نور به گونه، مرحله رشد و ترکیب طیفی وابسته است. برای مثال، در گیاهانی که تحت شرایط مختلف LED رشد کرده‌اند، تغییر شدت و کیفیت نور می‌تواند موجب تغییر محتوای کلروفیل شود (Ali and Tong, 2023; Lobiuc et al., 2024)، بدون آنکه این تغییر الزاماً به کاهش مستقیم ظرفیت فتوسنتزی منجر شود. بنابراین، تغییر غلظت کلروفیل به تنهایی شاخص قطعی تنش نوری یا کاهش عملکرد فتوسنتزی نیست. در پژوهش حاضر نیز، با توجه به نبود داده‌های مستقیم فتوسنتزی، بهتر است کاهش کلروفیل a صرفاً به عنوان یک پاسخ رنگیزه‌ای به افزایش شدت نور تفسیر شود و از نسبت دادن قطعی آن به فتواکسیداسیون، تولید گونه‌های فعال اکسیژن یا آسیب فتوسیستم II اجتناب شود.

در مقابل، کاهش رشد ریشه نیز با افزایش شدت نور مشاهده شد. وزن تر ریشه از ۲/۷۷ گرم در شدت ۲۰۰ به ۱۹/۹۹ گرم در شدت ۴۰۰ و طول ریشه از ۳۱/۲۱ به ۲۲/۲۲ سانتی‌متر کاهش یافت. از آنجا که رشد ریشه به وضعیت رشد اندام هوایی، تخصیص مواد فتوسنتزی و سیگنال‌های نوری و هورمونی وابسته است، تغییر شرایط نوری می‌تواند به طور غیرمستقیم معماری و رشد ریشه را نیز تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات انجام‌شده روی گیاهان دارویی در شرایط کنترل‌شده نیز نشان داده‌اند که کیفیت نور می‌تواند بر تشکیل و توسعه ریشه اثرگذار باشد (Lobiuc et al., 2017; Saeedi et al., 2024). برای مثال، در *S. kakudensis*، نور قرمز و آبی موجب تغییر معنی‌دار رشد ریشه شد و نور قرمز در شرایط آن مطالعه بیشترین رشد ریشه

بنابراین نمی‌توان یک رابطه عمومی و ثابت بین افزایش شدت نور و تمام صفات رشدی گیاهان مختلف در نظر گرفت. در پژوهش حاضر نیز کاهش ارتفاع و تعداد برگ در شدت‌های بالاتر نشان می‌دهد که افزایش PPFD فراتر از سطح ۲۰۰ میکرومول در شرایط آزمایش الزاماً به افزایش رشد رویشی منجر نشد.

کاهش سطح برگ در شدت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول نیز از یافته‌های مهم پژوهش حاضر بود. سطح برگ از ۴۱/۲۵ میلی‌متر مربع در شدت ۲۰۰ به ۲۳/۵۷ میلی‌متر مربع در شدت ۴۰۰ کاهش یافت. از نظر فیزیولوژیک، تغییر سطح برگ می‌تواند یکی از پاسخ‌های مورفولوژیک گیاه به تغییر شرایط نوری باشد و بر ظرفیت دریافت نور و تبادل گاز اثر بگذارد، با این حال، در پژوهش حاضر اندازه‌گیری مستقیم فتوسنتز یا سایر شاخص‌های فتوسنتزی انجام نشده است و بنابراین نمی‌توان کاهش سطح برگ را مستقیماً به آسیب فتوسیستم یا محدودیت فتوسنتزی نسبت داد. مطالعات انجام‌شده در شرایط کنترل‌شده نیز نشان داده‌اند که پاسخ سطح برگ به شدت و طیف نور به گونه و ژنوتیپ وابسته است (Paradiso and Proietti, 2022). برای مثال، در گیاهان برگ‌گی از جمله کاهو و ریحان، تغییر شدت یا نسبت نور قرمز و آبی می‌تواند موجب تغییر در سطح برگ و معماری بوته شود (Pennisi et al., 2020; Sheikhi et al., 2024). با توجه به معنی‌دار شدن برهم‌کنش شدت نور و نورقرمز دور برای سطح برگ در پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد این صفت در مقایسه با بسیاری از صفات دیگر حساسیت بیشتری به ترکیب شدت و کیفیت نور داشته است؛ با این حال، این نتیجه باید محدود به همین صفت و دامنه تیمارهای آزمایش حاضر تفسیر شود.

کاهش کلروفیل a از ۱/۸۷ به ۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر با افزایش شدت نور از ۲۰۰ به ۴۰۰ میکرومول نیز نشان داد که پاسخ رنگیزه‌های

"رَفِعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

را ایجاد کرد. تفاوت میان آن نتایج و پژوهش حاضر می‌تواند ناشی از تفاوت گونه، شدت نور، ترکیب طیفی، شرایط کشت و مرحله رشدی باشد. بالاین‌حال، در پژوهش حاضر از آنجا که برهم‌کنش شدت نور با FR و اکوتیپ برای طول ریشه معنی‌دار نبود، کاهش طول و وزن ریشه را می‌توان عمدتاً در ارتباط با اثر اصلی افزایش شدت نور در دامنه مورد بررسی تفسیر کرد.

یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش حاضر، برتری اکوتیپ برگ‌پهن نسبت به اکوتیپ اصفهانی در بخش قابل توجهی از صفات بود. اکوتیپ برگ‌پهن از نظر تعداد برگ، قطر ساقه، ارتفاع، وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر و خشک ریشه، سطح برگ و RWC میانگین بیشتری داشت. این نتیجه با شواهد مربوط به تنوع مورفولوژیک در جمعیت‌ها و دسترسی‌های مختلف مرزه تابستانه مطابقت دارد. فاتمی و همکاران (۲۰۲۱) نیز در بررسی دسترسی‌های مختلف مرزه تابستانه، تنوع قابل توجهی را در صفات مورفولوژیک و فیتوشیمیایی گزارش کردند و نشان دادند که دسترسی‌های این گونه از نظر ارتفاع بوته، عملکرد خشک، طول برگ و ترکیب اسانس با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین، اختلاف مشاهده‌شده بین دو اکوتیپ در پژوهش حاضر نشان‌دهنده تفاوت در عملکرد رشدی مواد گیاهی مورد مطالعه در شرایط محیطی یکسان است و می‌تواند با تفاوت‌های ژنتیکی و پیشینه سازگاری آن‌ها مرتبط باشد؛ بالاین‌حال، از آنجا که در پژوهش حاضر ارزیابی ژنتیکی یا آزمون اختصاصی سازگاری انجام نشده است، نمی‌توان این تفاوت فنوتیپی را مستقیماً به یک سازوکار ژنتیکی یا فیزیولوژیک مشخص نسبت داد.

نکته قابل توجه این است که با وجود تفاوت معنی‌دار بین دو اکوتیپ، برهم‌کنش شدت نور $\times$ اکوتیپ در هیچ‌یک از صفات مورفولوژیک معنی‌دار نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه دو اکوتیپ از نظر مقدار مطلق صفات رشد با یکدیگر

تفاوت داشتند، الگوی کلی پاسخ آن‌ها به افزایش شدت نور مشابه بود. به عبارت دیگر، اکوتیپ برگ‌پهن در شرایط مورد مطالعه عملکرد مورفولوژیک بالاتری داشت، اما شواهد آماری کافی برای اختصاصی‌بودن پاسخ آن به شدت نور مشاهده نشد. این یافته از نظر کاربردی اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد انتخاب اکوتیپ بر سطح عملکرد کلی اثرگذار است، در حالی که تغییر شدت نور در دامنه مورد بررسی، الگوی پاسخ متفاوتی در دو اکوتیپ ایجاد نکرد. تفاوت این نتیجه با مطالعاتی که اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ محیط را گزارش کرده‌اند، می‌تواند به تفاوت مواد ژنتیکی، دامنه شدت نور، مدت اعمال تیمار و شرایط محیطی آزمایش مربوط باشد.

اثر نور قرمز دور نیز در تعدادی از صفات، از جمله ارتفاع، تعداد برگ، قطر ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، سطح برگ، کلروفیل a و RWC معنی‌دار بود؛ بالاین‌حال، اثر آن در همه صفات یکسان نبود. این موضوع با مطالعات جدید درباره نور قرمز دور در سامانه‌های کشت کنترل‌شده همخوانی دارد (Liu and van Iersel, 2022). نشان دادند که افزودن نور قرمز دور به نور زمینه در کاهو می‌تواند رشد و وزن خشک شاخساره را افزایش دهد، اما شدت این پاسخ به رقم وابسته بود؛ به‌طوری‌که برخی ارقام افزایش وزن خشک نشان دادند و یک رقم پاسخ معنی‌داری نداشت. همچنین، در گیاه کلم چینی، افزودن نور قرمز دور موجب افزایش ارتفاع، طول میان‌گره، قطر ساقه، سطح برگ و وزن تر و خشک بخش خوراکی شد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که FR صرفاً یک عامل مؤثر بر تأمین انرژی فتوسنتزی نیست، بلکه می‌تواند از طریق مسیرهای فتومورفوژنیک، به‌ویژه سامانه فیتوکروم، معماری گیاه را تغییر دهد.

بالاین‌حال، نتیجه پژوهش حاضر در مورد نور قرمز دور با همه مطالعات قبلی یکسان نیست. برای

مثال، در *Artemisia annua*، افزودن FR موجب افزایش ارتفاع، اما کاهش سطح برگ و وزن تر و خشک شد؛ در همان مطالعه نیز نویسندگان بر وجود موازنه بین تغییر معماری گیاه و تولید زیست توده تأکید کردند. همچنین، مطالعات انجام شده روی ریزسبزی ها نشان داده اند که پاسخ به افزودن FR می تواند بین گونه ها متفاوت باشد و در برخی گونه ها افزایش ارتفاع همراه با کاهش زیست توده یا تغییر در ترکیبات فنلی مشاهده شود (Lobiuc et al., 2017). بنابراین، افزایش یا کاهش یک صفت در حضور FR را نمی توان به صورت مستقل از گونه، شدت FR، نسبت R/FR، شدت نور زمینه و مدت تیمار تفسیر کرد. در پژوهش حاضر نیز FR در برخی صفات اثر معنی دار داشت، اما نبود برهم کنش معنی دار FR با اکوتیپ نشان می دهد که تفاوت دو اکوتیپ موجب تغییر اساسی در پاسخ صفات به FR نشده است.

در پژوهش حاضر، اثر متقابل شدت نور × نور قرمز دور فقط برای سطح برگ معنی دار بود و برای بیشتر صفات، برهم کنش های دوگانه و سه گانه معنی دار نشدند. این الگو نشان می دهد که پاسخ بسیاری از صفات مرز به FR، در محدوده شدت های نوری مورد مطالعه، عمدتاً مستقل از تغییر شدت نور بود؛ باین حال، سطح برگ از این قاعده مستثنی بود و به ترکیب شدت و کیفیت نور پاسخ متفاوتی نشان داد. بنابراین، برای صفاتی که برهم کنش شدت × FR در آن ها معنی دار نبود، تفسیر اثر FR را می توان بر اساس اثر اصلی آن انجام داد، اما برای سطح برگ، بررسی میانگین های ترکیبی شدت نور و FR ضروری است. از این رو، نمی توان اثر FR را در کل آزمایش به عنوان عاملی وابسته به شدت نور معرفی کرد؛ بلکه شواهد آماری موجود نشان می دهد که وابستگی پاسخ به شدت نور عمدتاً به سطح برگ محدود بوده است.

RWC نیز در پژوهش حاضر تحت تأثیر شدت نور قرار گرفت و با افزایش شدت نور کاهش معنی داری نشان داد. بر اساس جدول ۲، میانگین RWC از ۱۵/۷۶ درصد در شدت ۲۰۰ به ۰۶/۷۱ درصد در شدت ۳۰۰ و ۵۹/۶۶ درصد در شدت ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه کاهش یافت. بنابراین، برخلاف آنچه ممکن است از بررسی مستقل نمودارهای مربوط به تیمارها برداشت شود، اثر اصلی شدت نور بر RWC از نظر آماری معنی دار بود. باین حال، از آنجا که برهم کنش شدت نور با نور قرمز دور و همچنین برهم کنش شدت نور با اکوتیپ معنی دار نشد، شواهد آماری کافی برای آنکه این کاهش را به صورت یک پاسخ اختصاصی برای یک اکوتیپ یا یک وضعیت حضور/عدم حضور FR تفسیر کنیم وجود ندارد. کاهش RWC در شدت های بالاتر می تواند با تغییر تعادل آب گیاه در شرایط دریافت نور بیشتر مرتبط باشد، اما با توجه به اینکه تبخیر-تعرق، هدایت روزنه ای و پتانسیل آب در این آزمایش اندازه گیری نشده اند، نمی توان مسیر فیزیولوژیک مشخصی را برای این تغییر اثبات کرد. از سوی دیگر، اثر معنی دار FR و اکوتیپ بر RWC نشان می دهد که هر دو عامل نیز در تنظیم وضعیت آب نسبی برگ در شرایط آزمایش حاضر نقش داشتند، اگرچه نبود برهم کنش های معنی دار نشان می دهد که اثر آن ها وابسته به شدت نور نبوده است. مطالعات جدید نشان داده اند که FR می تواند بر رفتار روزنه ای و تبادل آب نیز اثر بگذارد (Solouki et al., 2023)؛ برای نمونه، در ریحان شیرین، نور قرمز دور بر باز شدن روزنه و تبادل آب اثرگذار گزارش شده است. بنابراین، بررسی هم زمان RWC با شاخص های تبادل گاز در مطالعات آینده می تواند درک دقیق تری از رابطه میان محیط نوری و وضعیت آبی مرز فراهم کند (Solouki et al., 2023).

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

پیچیده ناشی از برهم کنش شدت و کیفیت طیفی نور حمایت نمی کند؛ بلکه نشان می دهد که در شرایط آزمایش حاضر، شدت نور عمدتاً به عنوان عامل اصلی، و FR و اکوتیپ به عنوان عوامل مؤثر بر برخی صفات، الگوی رشد گیاه را تعیین کردند. برتری اکوتیپ برگ پهن نیز نشان دهنده عملکرد رشدی بالاتر این اکوتیپ در شرایط آزمایش بود، بدون آنکه بتوان بر اساس داده های موجود علت این تفاوت را به یک سازوکار ژنتیکی مشخص نسبت داد.

از دیدگاه ایمنی زیستی و تولید پایدار در محیط های کنترل شده، اهمیت این یافته ها در امکان استانداردسازی شرایط رشد و کاهش تغییرپذیری ناشی از عوامل محیطی است. استفاده از شدت نور مناسب و ماده گیاهی مطلوب می تواند به تولید زیست توده یکنواخت تر و قابل پیش بینی تر کمک کند؛ با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر ترکیب اسانس، بار میکروبی، شاخص های فیزیولوژیک تنش و کیفیت شیمیایی زیست توده اندازه گیری نشده است، نمی توان درباره افزایش مستقیم ایمنی یا کیفیت دارویی محصول نتیجه گیری کرد. در نتیجه، برای تکمیل ارزیابی ایمنی زیستی این سامانه، مطالعات آینده باید علاوه بر صفات مورفولوژیک، شاخص های فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل، وضعیت اکسیداتیو و آنتی اکسیدانی، ترکیب اسانس و متابولیت های ثانویه و همچنین شاخص های کیفی و میکروبیولوژیک محصول را در شرایط مختلف نوری بررسی کنند. چنین رویکردی امکان تعیین یک رژیم نوری بهینه را نه فقط بر اساس تولید زیست توده، بلکه بر مبنای کیفیت، یکنواختی و قابلیت اطمینان تولید مرزه در سامانه های کشت کنترل شده فراهم خواهد کرد.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که در تولید مرزه تابستانه در سامانه های کشت کنترل شده، افزایش شدت نور لزوماً راهبرد مناسبی برای افزایش زیست توده نیست. در شرایط آزمایش حاضر، شدت ۲۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه، در مقایسه با ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول، عملکرد مطلوب تری از نظر مجموعه ای از صفات رویشی داشت. این نتیجه برای طراحی سامانه های تولید گیاهان دارویی اهمیت دارد، زیرا انتخاب شدت نور باید علاوه بر پاسخ زیستی، بر مبنای بهره وری مصرف انرژی نیز انجام شود (Pennisi et al., 2020). مطالعات مربوط به کشاورزی محیط کنترل شده نیز بر ضرورت بهینه سازی همزمان رشد گیاه و مصرف انرژی در سامانه های LED تأکید کرده اند. بنابراین، در شرایط مشابه آزمایش حاضر، استفاده از شدت های بالاتر از ۲۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه لزوماً مزیت رشدی ایجاد نمی کند و ممکن است بدون افزایش متناظر در زیست توده، مصرف انرژی سیستم را افزایش دهد.

در مجموع، یافته های پژوهش حاضر نشان داد که شدت نور مهم ترین عامل مؤثر بر تغییرات صفات مورفولوژیک و رشد رویش مرزه تابستانه در دامنه شرایط مورد مطالعه بود. افزایش شدت نور از ۲۰۰ به ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه با کاهش معنی دار بسیاری از صفات رشدی همراه شد، در حالی که نور قرمز دور و تفاوت بین اکوتیپ ها نیز برای تعدادی از صفات اثر معنی دار داشتند. با وجود این، برهم کنش شدت نور × اکوتیپ و نور قرمز دور × اکوتیپ برای صفات مورد بررسی معنی دار نبود و برهم کنش شدت نور در FR نیز تنها برای سطح برگ و قطر ساقه معنی دار شد و برای سایر صفات مورد بررسی معنی دار نبود. بنابراین، نتایج حاضر از وجود یک پاسخ گسترده و

منابع

- Adiguzel A, Ozer H, Kilic H, Cetin B. (2007) Screening of antimicrobial activity of essential oil and methanol extract of *Satureja hortensis* on foodborne bacteria and fungi. *Czech Journal of Food Sciences*. 25(2): 81–89. <https://doi.org/10.17221/753-CJFS>.
- Ali HE, Tong Y. (2023) Volatile oil concentration and growth of thyme (*Thymus vulgaris* L.) plants responded to red to blue light ratios. *Technology in Horticulture*. 3(1): 2. <https://doi.org/10.48130/THI-2023-0002>.
- Arnon DI. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24(1): 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>.
- Choi JH, Kim SW, Yu R, Yun JW. (2017) Monoterpene phenolic compound thymol promotes browning of 3T3-L1 adipocytes. *European Journal of Nutrition*. 56: 2329-2341. <https://doi.org/10.1007/s00394-016-1273-2>.
- Dou H, Niu G, Gu M, Masabni JG. (2018) Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality. *HortScience*. 53(4): 496-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12785-17>.
- Dsouza A, Dixon M, Shukla M, Graham T. (2025). Harnessing controlled-environment systems for enhanced production of medicinal plants. *Journal of Experimental Botany*. 76(1): 76–93. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae248>.
- Ejaz A, Waliat S, Arshad MS, Khalid W, Khalid MZ, Suleria HAR, Luca MZ, Mironeasa C, Batariuc A, Ungureanu-Luga M, Coțovanu L, Mironeasa S. (2023) A comprehensive review of summer savory (*Satureja hortensis* L.): Promising ingredient for production of functional foods. *Frontiers in Pharmacology*. 14: 1198970. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1198970>.
- Fathi R, Mohebodini M, Chamani E, Sabaghnia N. (2021) Morphological and phytochemical variability of *Satureja hortensis* L. accessions: An effective opportunity for industrial production. *Industrial Crops and Products*. 162: 113232. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113232>.
- Fierascu I, Dinu-Pirvu CE, Fierascu RC, Velescu BS, Anuta V, Ortan A, Jinga V. (2018) Phytochemical profile and biological activities of *Satureja hortensis* L.: A review of the last decade. *Molecules*. 23(10): 2458. <https://doi.org/10.3390/molecules23102458>.
- Ghobadi S, Marouf IA, Majd M. (2016) Differential expression of the key genes involved in the biosynthesis of monoterpenes in different tissues and in response to abiotic elicitors in summer savory (*Satureja hortensis*). *Cell and Tissue Journal*. 7(3): 275-291. [In Persian]
- Hadian J, Tabatabaei SMF, Naghavi MR, Jamzad Z, Ramak-Masoumi T. (2008) Genetic diversity of Iranian accessions of *Satureja hortensis* L. based on horticultural traits and RAPD markers. *Scientia Horticulturae*. 115(2): 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.08.007>.
- Hajhashemi V, Sadraei H, Ghannadi AR, Mohseni M. (2000) Antispasmodic and anti-diarrhoeal effect of *Satureja hortensis* L. essential oil. *Journal of Ethnopharmacology*. 71(1–2): 187–192. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(99\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(99)00209-3).
- Hashim M, Ahmad B, Drouet S, Hano C, Abbasi BH, Anjum S. (2021) Comparative effects of different light sources on the production of key secondary metabolites in plants in vitro cultures. *Plants*. 10(8): 1521. <https://doi.org/10.3390/plants10081521>.
- Humbal A, Pathak B. (2023) Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: A review ("VSI: secondary metabolites"). *Plant Stress*. 8: 100166. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100166>.
- Khalighi S, Zare Mehrjerdi M, Aliniaieifard S. (2021) Light quality affects phytochemicals content and antioxidant capacity of *Satureja hortensis*. *South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment*. 12(2): 99-117.
- Liu J, van Iersel MW. (2022) Far-red light effects on lettuce growth and morphology in indoor production are cultivar specific. *PLANTS*. 11(20): 2714. <https://doi.org/10.3390/plants11202714>.
- Lobiuc A, Vasilache V, Oroian M, Stoleru T, Burducea M, Pintilie O, Zamfirache MM. (2017) Blue

"رفیعی و همکاران، اثر شدت نور و نور قرمز دور بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دو اکوتیپ مرزه ..."

- and red LED illumination improves growth and bioactive compounds contents in acyanic and cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens. *Molecules*. 22(12): 2111. <https://doi.org/10.3390/molecules22122111>.
- Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA. (2008)** Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*. 43(7): 1951-1956. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>.
- Paradiso R, Proietti S. (2022)** 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*. 41: 742–780. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>.
- Pennisi G, Pistillo A, Orsini F, Cellini A, Spinelli F, Nicola S, Fernandez JA, Crepaldi A, Gianquinto G, Marcelis LFM. (2020)** Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae*. 275: 109508. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>.
- Ncube B, Finnie JF, Van Staden J. (2012)** Quality from the field: The impact of environmental factors as quality determinants in medicinal plants. *SOUTH AFRICAN JOURNAL OF BOTANY*. 82: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.05.009>.
- Rasouli F, Amini T, Skrovankova S, Asadi M, Hassanpouraghdam MB, Ercisli S, Buckova M, Mrzavka M, Mlcek J. (2023)** Influence of drought stress and mycorrhizal (*Funneliformis mosseae*) symbiosis on growth parameters, chlorophyll fluorescence, antioxidant activity, and essential oil composition of summer savory (*Satureja hortensis* L.) plants. *Forentiers in Plant Science*. 14: 1151467. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1151467>.
- Saeedi SA, Vahdati K, Aliniaiefard S, Sarikhani S, Dianati S, Davarzani M, Fakhari S. (2024)** Enhancing growth and morpho-physiological traits of tissue-cultured explants of Persian walnut through manipulation of in vitro lighting spectra. *Journal of Nuts*. 15(1): 71-80.
- Sheikhi H, Delshad M, Aliniaiefard S, Haghbeen K, Bababalar M, Nasiri R. (2024)** Enhancing growth and nutritional quality in greenhouse-grown ‘Little Gem’ lettuce using LED supplemental lighting. *International Journal of Horticultural Science and Technology*. 11(3): 353-368. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2023.364300.690>.
- Solouki A, Mehrjerdi MZ, Aliniaiefard S, Azimi R. (2023)** Postharvest light and temperature elicitors improve chemical composition and level of essential oils in basil (*Ocimum basilicum* L.) through boosting antioxidant machinery. *Postharvest Biology and Technology*. 199: 112279. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112279>.
- Terashima I, Fujita T, Inoue T, Chow WS, Oguchi R. (2009)** Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant and Cell Physiology*. 50(4): 684-697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>.
- Tohidi B, Rahimmalek M, Arzani A, Sabzalian MR. (2020)** Thymol, carvacrol, and antioxidant accumulation in Thymus species in response to different light spectra emitted by light-emitting diodes. *Food Chemistry*. 307: 125521. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125521>.
- Wesolowska A, Grzeszczuk M, Jadczyk D. (2015)** Influence of distillation method on the content and composition of essential oil isolated from summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 18(1): 215-221. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.9312>.
- Zubay P, Ruttner K, Ladányi M, Deli J, Németh Zámbariné É, Szabó K. (2021)** In the shade – Screening of medicinal and aromatic plants for temperate zone agroforestry cultivation. *Industrial Crops and Products*. 170: 113764. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113764>.
- Zhiponova M, Zehirov G, Rusanov K, Rusanova M, Stefanova M, Ganeva T, Paunov M, Ganeva V, Mishev K, Dobrev PI, Vaculíková R, Motyka V, Yordanova Z, Chaneva G, Vassileva V. (2025)** Blue–red LED light modulates morphophysiological and metabolic responses in the medicinal plant *Nepeta nuda*. *Plants*. 14(15): 2285. <https://doi.org/10.3390/plants14152285>.

Effects of Light Intensity and Far-Red Light on the Morphological and Physiological Traits of Two Ecotypes of Summer Savory (*Satureja hortensis* L.) under Controlled Cultivation Conditions

Zohreh Rafiee¹, Seyed Ahmad Sadat-Noori¹, Seyed Mohammad Mahdi Mortazaviyan¹, Hossein Ramshini¹, Hadi Kalantari Khalilabad²

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran

2. Department of Biotechnology, Medicinal Plants Research Institute, Jahad Daneshgahi

noori@ut.ac.ir

Abstract

Summer savory (*Satureja hortensis* L.) is a medicinal plant whose growth and biomass production are influenced by light conditions. This study was conducted under controlled conditions to investigate the effects of light intensity, far-red (FR) light, and ecotype on the morphological and physiological traits of two Iranian summer savory ecotypes (Broad-leaf and Esfahani). The experiment was performed as a factorial arrangement in a randomized complete block design with three factors: ecotype, light intensity at three levels (200, 300, and 400 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and the presence or absence of FR light. Analysis of variance showed that light intensity was the most influential factor affecting the evaluated traits, with significant effects on plant height, number of leaves and lateral branches, stem diameter, biomass, root length, leaf area, chlorophyll a, and relative water content (RWC). FR light and ecotype also had significant effects on several traits. The Broad-leaf ecotype exhibited higher mean values than the Esfahani ecotype for most traits. Most two- and three-way interactions were not significant, whereas the interaction between light intensity and FR light was significant for some traits, including leaf area and stem diameter. The 200 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ light intensity resulted in the highest values for several growth-related traits. Overall, light intensity was the primary factor determining the growth performance of summer savory under the controlled conditions of this study.

Keywords: Light Intensity, Morphological Traits, LED Light Spectrum, *Satureja hortensis* L