

Evaluation the effect of supplemental light intensity and spectrum on growth characteristics of duckweed (*Lemna minor* L.)

ABSTRACT

Duckweeds with desirable nutritional value and high potential for biomass production have been considered in recent years as promising plants for feeding the world's growing population. Few researches have been conducted on environmental requirements for optimal production of their biomass. In order to study of the effect of supplemental light intensity and spectrum on some growth characteristics of *Lemna minor* an experiment was conducted in a research greenhouse of Department of Horticultural Sciences, University of Tehran. Experimental treatments included supplemental LED light as white, red-blue spectra in ratios of 1:2 and 2:1 and two light intensity levels of 150 and 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Analysis of some indices at the end of cultivation period, showed that the effect of light intensity on growth traits was more effective than light spectrum. Fresh weight, dry weight, relative growth rate, linear growth rate and biomass doubling time were affected by light intensity. The findings of this study confirmed that increasing light intensity improves biomass producing potential of *L. minor*. Also, the interaction effect of spectrum and light intensity on nitrogen percentage and protein content of biomass was significant. Use of red-blue spectrums compared to white spectrum increased protein content. The results of this research highlighted the importance of the lighting systems in the optimum production of duckweed biomass. Understanding the relationship between light parameters and duckweed physiology will help us to provide appropriate light condition for sustainable biomass production as source of animal feed and food.

Key words: Biomass, Duckweed, Growth and Development, Light Intensity, Light Spectrum

ارزیابی اثر طیف و شدت نور تکمیلی بر خصوصیات رشدی عدسک آبی (*Lemna minor* L.)

چکیده

عدسک‌های آبی با ارزش غذایی مطلوب و پتانسیل بالای تولید زی‌توده، در سال‌های اخیر به عنوان گیاهانی امیدبخش برای تأمین نیاز غذایی جمعیت در حال رشد جهان مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات محدودی در زمینه نیازهای محیطی جهت تولید بهینه زی‌توده این گیاهان انجام گرفته است. به منظور بررسی اثر شدت و طیف نور تکمیلی بر برخی شاخص‌های رشدی عدسک آبی گونه *Lemna minor*، آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشگاه تهران انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل نور LED در طیف‌های سفید، قرمز-آبی در نسبت‌های (۱:۲) و (۲:۱) و دو سطح شدت نور ۱۵۰ و ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود. بررسی برخی از شاخص‌های کمی و کیفی در پایان دوره کشت، نشان داد که اثر شدت نور بر صفات رشدی موثرتر از طیف نور بوده است. وزن تر، ماده خشک، سرعت رشد نسبی، سرعت رشد خطی و زمان دوبرابری زی‌توده تحت تأثیر شدت نور قرار گرفتند. یافته‌های این تحقیق تأیید کرد که افزایش شدت نور پتانسیل تولید زی‌توده گونه *L. minor* را بهبود می‌بخشد. همچنین اثر متقابل طیف و شدت نور بر درصد نیتروژن و محتوای پروتئین زی‌توده معنی‌دار شد. طیف‌های قرمز-آبی در مقایسه با طیف سفید محتوای پروتئین را افزایش دادند. نتایج این پژوهش اهمیت بهینه‌سازی سیستم‌های نوردهی را در تولید بهینه زی‌توده عدسک آبی روشن ساخت. درک ارتباط پیچیده پارامترهای نور و فیزیولوژی عدسک آبی در دستیابی به شرایط نوری مناسب جهت تولید پایدار زی‌توده به عنوان منبع خوراک دام و غذای انسان، به ما کمک خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: رشد و نمو، زی‌توده، عدسک آبی، شدت نور، طیف نور

مقدمه

پیش‌بینی می‌شود جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹/۳ میلیارد نفر افزایش یابد و این افزایش جمعیت نیاز به محصولات غذایی با عملکرد و ارزش غذایی مطلوب را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد (Kozai, 2013a). عدسک‌های آبی گیاهانی کوچک، شناور و گل‌ده از خانواده Lemnaceae هستند که به طور وسیعی در سراسر جهان از معتدل تا نیمه‌گرمسیری پراکنده‌اند (Landolt et al., 1997; Wang et al., 2010). این خانواده شامل ۳۸ گونه در ۵ جنس می‌باشند. به جای برگ و ساقه، دارای ساختاری پهن و برگ‌

شکل به نام فرند¹ هستند (Les et al., 1997; Wang et al., 2010). سرعت تکثیر بالا، مقدار زیاد پروتئین در وزن خشک و برداشت آسان از دلایل گسترش کاربرد این گیاهان است، گونه *Lemna minor* به دلیل ساختار نسبتاً ساده و رشد سریع، به طور گسترده‌ای در تحقیقات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی استفاده می‌شود (stomp, 2005) سادگی کار با این گیاهان آنها را مناسب برای تحمین اثرات فاکتورهای مختلف غیر زیستی مانند شدت نور و طیف نور نموده است (Wang et al., 2010).

مطالعات نشان داده است که گونه‌های عدسک آبی به دلیل سرعت نسبی رشد بالا و محتوای پروتئین قابل مقایسه با سویا و تطابق با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی از نظر ترکیب مناسب اسید آمینه، پتانسیل بالایی به عنوان منبع غذایی برای انسان دارند. (Ziegler et al., 2015). بیشتر علف‌های آبی دارای ترکیباتی هستند که آن‌ها را برای استفاده در تغذیه واجد شرایط نموده است که در این بین گونه *L. minor* یک گزینه مناسب به عنوان خوارک اقتصادی دام در کشورهای در حال توسعه می‌باشد (Mcclure & Alston, 1966).

پیشینه پژوهش

به منظور تولید ممتد و در مقدار زیاد زی‌توده، با کیفیتی تعریف شده به‌ویژه برای تغذیه انسان، یک فرآیند کشت استاندارد و سیستم کار، با محیط کشت مناسب و استفاده از نور مصنوعی ضرورت دارد تا در آینده تولید را به سمت کشت‌های عمودی گلخانه‌ای و سیستم‌های چرخه‌ای هدایت کند و کارایی استفاده از زمین افزایش یابد (Coughlan et al., 2022, Peterson et al., 2022). فتوسنتز فرآیند متابولیک و دینامیک پایه در گیاهان است که رشد و تولید زی‌توده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بستگی زیادی به شرایط محیطی مثل نور به عنوان منبع انرژی دارد (Kaiser et al, 2019). بنابراین نور یکی از فاکتورهای محیطی ضروری برای رشد گیاه می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد میزان شدت نور، طیف و طول دوره تابش متغیر بوده و روی کارایی فتوسنتزی و فاکتورهای رشد تأثیرگذار می‌باشند (Roach & Krieger-Liszky, 2019). نقطه اشباع نوری بسته به فاکتورهایی مانند دما و گونه متفاوت است (Lasfar, et al., 2007). در پژوهش (Yin et al., 2015)، افزایش شدت نور و فتوپریود، سرعت رشد و مقدار زی‌توده تولیدی را در گونه *Lemna aequinoctialis* شدت بخشید. در مقایسه سه سطح شدت نور (۱۲۵، ۲۳۶ و ۴۵۹ میکرومول بر مترمربع در ثانیه)، بهترین سرعت رشد برای دو گونه *Lemna minor* و *Spirodela polyrhiza* در شدت نور ۲۳۶ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بدست آمد، گونه *L. minor* در شدت نور بالاتر نیز رشد خود را حفظ نمود (Strzałek & Kufel, 2021). بر اساس یافته‌های Landolt & Kandelere (1987) شدت نور روی رنگدانه‌های برگ، زی‌توده و اندازه فرند، و محتوای پروتئین اثر می‌گذارد و واکنش گیاهان به شدت نور، بستگی به دسترسی به مواد غذایی، دما و گونه دارد.

گیاهان تحت طیف‌های مختلف نوری، واکنش‌های متفاوتی از خود بروز می‌دهند (Bantis et al., 2020). کیفیت نور، پارامترهای مختلف از جمله تولید زی‌توده، بیوسنتز کارتنوئید، کلروفیل و پروتئین را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Torri, 2017). گزارش‌های منتشر شده از (Jiang et al., 2017) نشان می‌دهد طول موج‌های خاصی از نور در رشد گیاهان نقش دارند و نور قرمز و آبی مهم‌ترین بخش نور مورد نیاز برای رشد و نمو گیاهان را تشکیل می‌دهند.

با توجه به این موضوع که پیکره گیاه بخش قابل برداشت عدسک آبی می‌باشد، نور نقش مهمی در فتوسنتز و تولید حداکثری زی‌توده دارد. استفاده از ال‌ای‌دی (LED) مزایای قابل توجهی با توجه به کنترل طیف نوری، کارایی انرژی و کاهش گرمای خروجی در مقایسه با سایر منابع انرژی دارد (Coughlan et al., 2022). در کشت‌های گلخانه‌ای امکان استفاده از طیف مورد نظر برای گیاهان و گونه‌های مختلف میسر می‌باشد (Shimizu et al., 2011). به دلیل اهمیت نور در محیط‌های کنترل شده و تولید بهینه محصولات،

¹ Frond

در گلخانه به‌ویژه در فصل زمستان از نور تکمیلی استفاده می‌شود. تنوع و تفاوت زیاد در عملکرد واقعی و بالقوه عدسک آبی دلالت بر این نکته دارد که یک توافق عمومی بر فاکتورهای مختلف اثرگذار بر رشد هنوز وجود ندارد (Goopy & Murray, 2003) و چالش‌ها در زمینه شرایط مطلوب نوری برای رشد عدسک آبی هنوز زیاد است. بنابراین با توجه به اثر نور بر رشد کمی و کیفی گیاهان و محدودیت نور در فصل زمستان در گلخانه‌ها، هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر طیف‌های و شدت‌های مختلف نور تکمیلی بر رشد کمی و کیفی عدسک آبی گونه *L. minor*، در نظر گرفته شد.

روش‌شناسی پژوهش

مواد گیاهی و شرایط آزمایش

به منظور بررسی اثر نور تکمیلی با استفاده از لامپ‌های LED بر عملکرد کمی و کیفی زی‌توده گیاه عدسک آبی، آزمایشی در زمستان سال ۱۴۰۱ در گلخانه‌ی پژوهشی گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج انجام گرفت. نمونه ماده گیاهی انتخابی برای این پژوهش عدسک آبی، گونه *L. minor* بود که پس از جمع‌آوری از مرداب سراوان استان گیلان به گلخانه انتقال پیدا کرد، نمونه گیاهی قبل از آغاز کشت، با آب مقطر شسته شد و در یکم اسفند ۱۴۰۱ گلدان‌های (۲۲×۲۲×۲۰ سانتی‌متر) حاوی محلول یک چهارم هوگلند (Hoagland & Arnon, 1950) با ۵ گرم عدسک آبی تلقیح گردید، در طول دوره کشت، میانگین رطوبت نسبی ۴۶، دمای محیط ۲۴ درجه، دمای آب ۱۸ درجه و شدت تابش خورشیدی در گلخانه ۹۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود.

طرح آزمایشی و اعمال تیمارها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل نور تکمیلی با استفاده از لامپ‌های LED در سه طیف سفید، قرمز-آبی به نسبت ۲:۱ و قرمز-آبی به نسبت ۱:۲ در دو شدت نور تکمیلی ۱۵۰ و ۲۵۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه در طول کشت اعمال شد. تناوب نوری مصنوعی به صورت ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی اجرا شد.

ارزیابی صفات عملکردی و زی‌توده گیاهی

برداشت در دهم اسفند ۱۴۰۱ انجام گرفت و صفات وزن تر (عملکرد)، درصد ماده خشک، سرعت رشد خطی، سرعت رشد نسبی، زمان دوبرابری عملکرد، درصد نیتروژن، محتوای پروتئین زی‌توده، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم دو مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پس از اندازه‌گیری عملکرد با استفاده از ترازوی دیجیتال، به منظور بررسی درصد ماده خشک و سایر شاخص‌های رشدی، پاکت‌های حاوی نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه آون قرار گرفت. سنجش کلروفیل و کارتنوئید با استفاده از روش (Arnon, 1967) انجام گرفت (استخراج با استون و محاسبه میزان جذب نور با دستگاه اسپکتروفتومتر). اندازه‌گیری درصد نیتروژن و پروتئین با روش کج‌دال (Casal et al., 2000) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری شاخص حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم دو با دستگاه فلورکم مدل (Photon Systems Instruments, PSI, Czech FC 1000-H Republic) انجام گرفت.

شاخص سرعت رشد خطی (LGR^2) بر حسب میلی‌گرم بر گرم بر مترمربع از فرمول زیر (Xu, et al., 2019) محاسبه می‌شود:

$$LGR = \frac{(DW\%end \times FWend) - (DW\%start \times FWstart)}{time \times surface} \text{ gm}^{-2}d^{-1} \quad (1)$$

² Linear Growth Rate

شاخص سرعت رشد نسبی (RGR³) بر حسب میلی گرم بر گرم بر مترمربع از فرمول زیر (Hunt, 1978) محاسبه می شود:

$$RGR = \frac{\ln w_2 - \ln w_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

که w_1 و w_2 به ترتیب وزن تر ابتدا و انتهای دوره کشت می باشند و t_1 و t_2 زمان شروع و پایان آزمایش می باشند.

زمان دوبرابری عملکرد (DT⁴) بر اساس فرمول (Wendeouma et al. (2013) زیر اندازه گیری می شود:

$$DT = [\ln(2)] / RGR \quad (3)$$

تجزیه و تحلیل آماری

جهت تجزیه واریانس داده ها بر اساس طرح آزمایشی، از نرم افزار SAS استفاده گردید، مقایسه میانگین داده ها با استفاده از آزمون چنددامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و رسم جداول و نمودارها با نرم افزار Excel و word صورت پذیرفت.

یافته های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در جداول ۱ و ۲ ارائه گردیده است. مطابق نتایج جدول ۱، اثر شدت نور بر پارامترهای عملکرد در واحد سطح در سطح احتمال ۵ درصد و پارامترهای درصد ماده خشک، سرعت رشد خطی، سرعت رشد نسبی، زمان دوبرابری عملکرد در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. پارامترهای مذکور تحت تأثیر طیف نور قرار نگرفتند. اثر متقابل طیف و شدت نور در سطح احتمال یک درصد بر درصد نیتروژن و محتوای پروتئین زی توده معنی دار بود. نتایج ذکر شده در جدول ۲ نشان می دهد اثر شدت و طیف نور بر محتوای رنگدانه های فتوسنتزی و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم دو (F_v/F_m) معنی دار نبوده است و تیمارها از نظر مقایسه میانگین در یک گروه آماری قرار گرفتند. در ادامه صفات معنی دار شده به صورت جداگانه مورد بحث قرار می گیرند. مقایسه میانگین داده ها با استاندارد ارور نشان داده شده است.

جدول ۱: تجزیه واریانس تعدادی از صفات کمی و کیفی عدسک آبی

منبع تغییرات	درجه آزادی	ماده عملکرد	سرعت رشد خطی	سرعت رشد نسبی	زمان دوبرابری	درصد نیتروژن	محتوای پروتئین	فیبر خام
بلوک	۲	۰/۰۸۴ ^{ns}	۰/۳۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۲۴ ^{ns}	۰/۰۷۵ ^{**}	۲/۹۸۸ ^{**}	۰/۵۱۷ ^{ns}
طیف نور	۲	۰/۰۶۶ ^{ns}	۱/۷۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۲۴ ^{ns}	۰/۱۶۹ ^{**}	۶/۵۵۳ ^{**}	۰/۲۲۹ ^{ns}
شدت نور	۱	۰/۳۶۱ [*]	۱۲/۵۷ ^{**}	۰/۰۰۱۵ ^{**}	۰/۱۱۸ ^{**}	۰/۰۰۶ ^{ns}	۰/۲۰۵ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}
اثر متقابل	۲	۰/۰۴۳ ^{ns}	۱/۶۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۱۸ ^{ns}	۰/۰۳۴ [*]	۱/۳۴۵ [*]	۶/۶۶ ^{ns}
خطا		۰/۰۲۹	۰/۱۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۲۲۵	۱/۵۴۸
ضریب تغییرات (%)		۱۰/۴۲۳	۸/۵۴	۸/۹۷	۳/۵۵۰۲	۱/۴۹۸	۱/۴۸۷	۸/۹۰۱

³ Relative Growth Rate

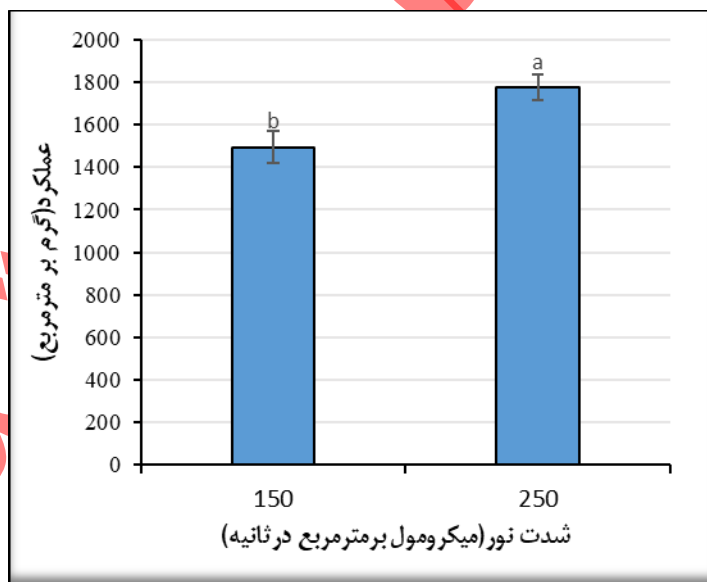
⁴ Doubling Time

جدول ۲: تجزیه واریانس رنگدانه‌های فتوسنتزی و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم دو

میانگین مربعات							منبع تغییرات
محتوای کارتنوئید	حداکثر کارایی کوانتومی	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل	کلروفیل b	کلروفیل a	درجه آزادی	
۰/۳۹۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۱۰ ^{ns}	۰/۳۱۶ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۲۳۰ ^{ns}	۲	بلوک
۰/۰۶۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۴۵ ^{ns}	۱/۷۳۷ ^{ns}	۰/۰۷۳ ^{ns}	۱/۱۰۵ ^{ns}	۲	طیف نور
۰/۱۹۰ ^{ns}	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۳۱ ^{ns}	۴/۰۱۴ ^{ns}	۰/۱۴۳ ^{ns}	۲/۶۴۹ ^{ns}	۱	شدت نور
۰/۲۱۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۵۱ ^{ns}	۰/۴۴۸ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۳۸۰ ^{ns}	۲	اثر متقابل
۰/۲۷۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۲۱	۱/۴۸۹	۰/۰۳۹	۱/۰۵۰		خطا
۱۵/۴۰۶	۰/۷۲۸۳۶	۲/۹۳۱	۱۳/۹۶۹	۱۳/۶۳۵	۱/۰۵۰		ضریب تغییرات (%)

اثر تیمار نوری بر عملکرد عدسک آبی

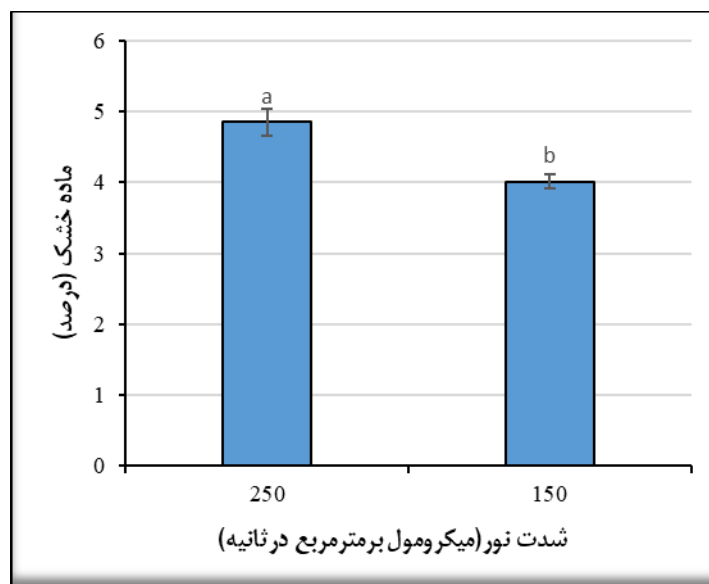
عملکرد (وزن تر در مترمربع) یکی از پارامترهای اصلی ارزیابی تیمارهای مختلف نور در عدسک آبی می‌باشد. نتایج آزمایش (شکل ۱) نشان داد که این شاخص تحت تأثیر شدت نور قرار گرفته و با افزایش شدت نور عملکرد افزایش پیدا کرده است. طبق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر کیفیت نور بر عملکرد گونه *L. minor* معنی‌دار نبود.



شکل ۱: تأثیر شدت نور بر عملکرد گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر درصد ماده خشک

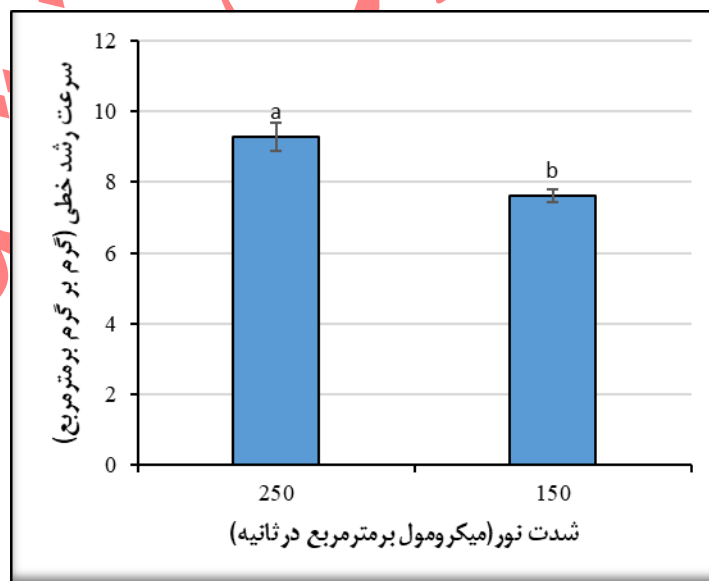
طبق نتایج حاصل از داده‌های بدست آمده (شکل ۲) اثر شدت نور تکمیلی بر درصد ماده خشک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و با افزایش شدت نور درصد ماده خشک افزایش پیدا کرده است. بین طیف‌های نور به کاربرد شده از نظر درصد ماده خشک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۱).



شکل ۲: تأثیر شدت نور بر درصد ماده خشک گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر سرعت رشد خطی

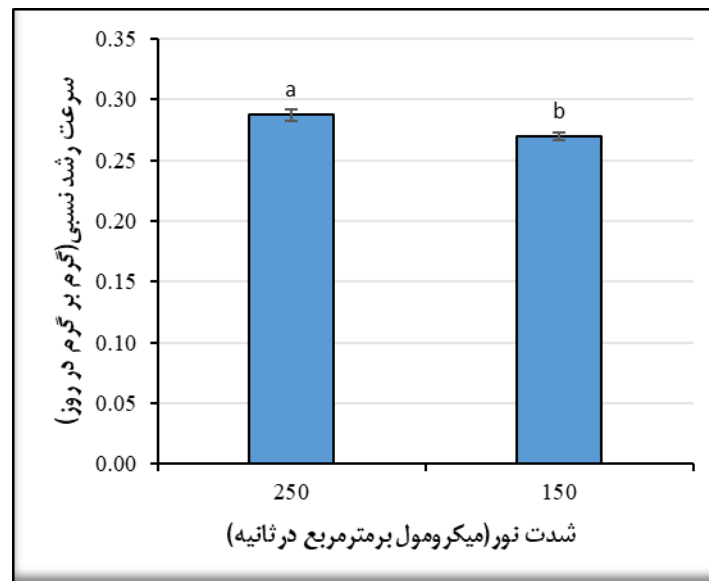
بررسی مقایسه میانگین یافته‌های حاصل از آزمایش (شکل ۳) نشان داد با افزایش شدت نور تکمیلی سرعت رشد خطی زی‌توده افزایش معنی‌داری در سطح یک درصد به وجود می‌آید. بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر طیف نور بر سرعت رشد خطی زی‌توده معنی‌دار نبود (جدول ۱).



شکل ۳: تأثیر شدت نور بر سرعت رشد خطی گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر سرعت رشد نسبی

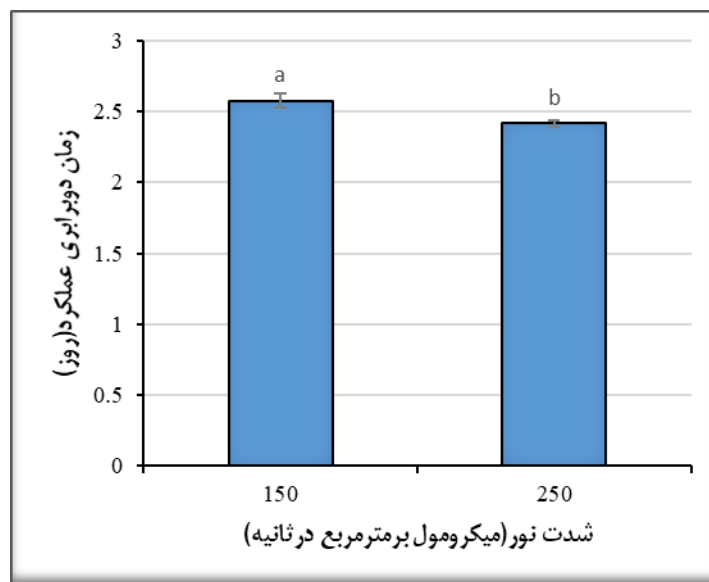
با توجه به نتایج این پژوهش (شکل ۴) شاخص سرعت رشد نسبی تحت تاثیر شدت نور قرار گرفته و با افزایش شدت نور تکمیلی، مقدار این شاخص افزایش پیدا می‌کند. بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (۱) کیفیت نور LED اثر معنی‌داری بر سرعت رشد نسبی نشان نداد.



شکل ۴: تأثیر شدت نور بر سرعت رشد نسبی گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر زمان دوبرابری عملکرد

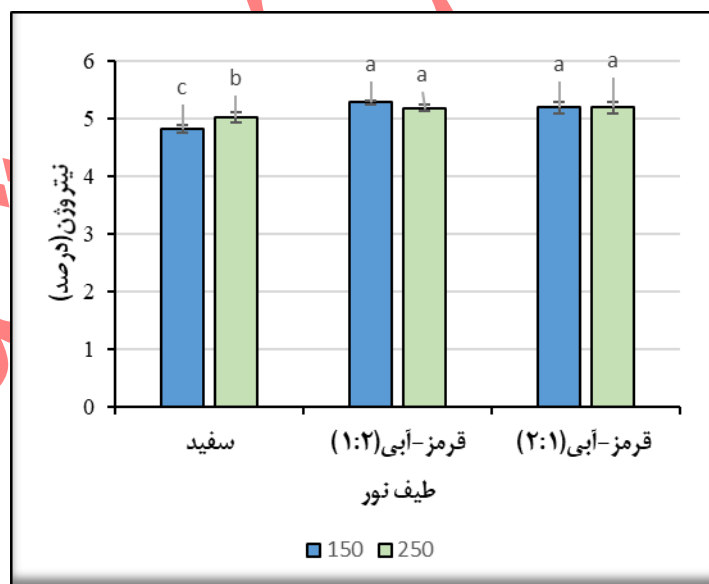
نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد اثر شدت نور بر زمان دوبرابری عملکرد معنی‌دار بوده و در شدت نور بالاتر این زمان کمتر بوده است (شکل ۵). همچنین بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر طیف نور بر زمان دوبرابری شدن زی‌توده معنی‌دار نبوده است.



شکل ۱: تأثیر شدت نور بر زمان دوبرابری زی توده گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر درصد نیتروژن زی توده

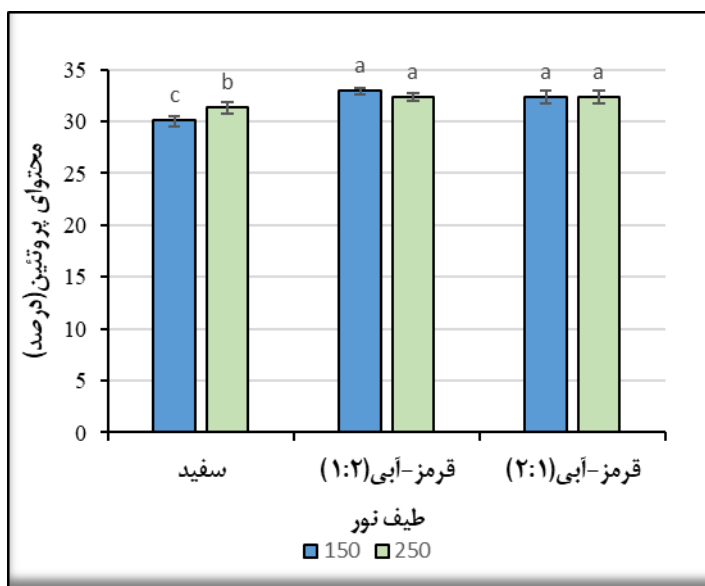
اثر متقابل شدت و طیف نور تکمیلی بر درصد نیتروژن زی توده در سطح ۵ درصد معنی دار بوده (شکل ۶) و طیف‌های نور قرمز+ آبی (نسبت ۱ به ۲) و قرمز+ آبی (نسبت ۲ به ۱) تفاوت معنی داری با طیف نور سفید نشان دادند.



شکل ۲: تأثیر متقابل شدت و طیف نور بر درصد نیتروژن زی توده گونه *Lemna minor*

اثر تیمار نوری بر محتوای پروتئین زی توده

نتایج حاصل از این پژوهش (شکل ۷) نشان داد اثر متقابل شدت و طیف نور تکمیلی بر محتوای پروتئین خام زی توده در سطح ۵ درصد معنی دار بوده و بین دو طیف نوری قرمز+ آبی (نسبت ۱ به ۲) و قرمز+ آبی (نسبت ۲ به ۱) تفاوت معنی دار نبود در حالیکه این دو تیمار در هر دو شدت نوری با طیف سفید تفاوت معنی دار دارند.



شکل ۳: تأثیر متقابل شدت و طیف نور بر محتوای پروتئین زی توده گونه *Lemna minor*

بحث

یافته‌های این پژوهش بیانگر اثر معنی دار شدت نور تکمیلی بر شاخص‌های رشدی از جمله عملکرد، درصد ماده خشک، LGR و RGR می‌باشد، با افزایش شدت نور تکمیلی حاصل از لامپ‌های LED، شاخص‌های مذکور افزایش پیدا می‌کنند، در تطابق با نتایج حاضر Yin et al., (2015) و Artetxe et al., (2002) به نتایج مشابهی درباره اثر شدت نور بر صفت عملکرد دست یافتند. مطالعات Zheng et al., (2011) نیز تأیید کرده است که تجمع مواد آلی در گیاهان در شدت نور پایین، به واسطه کاهش فعالیت آنزیم‌های تثبیت کننده کربن فتوسنتزی کم می‌باشد. بنابراین تحت شدت نور پایین رشد و تولید زی توده کاهش می‌یابد. در گزارش‌های Stewart et al., (2020) نیز، افزایش شدت نور تجمع مقدار بیشتر ماده خشک را به دنبال داشته است. در یافته‌های Givens et al., (2023)، با افزایش شدت نور از ۶۰ تا ۶۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه وزن خشک و تر نشاء کاهو افزایش یافت. توانایی حفظ سرعت رشد در دامنه‌ای از شدت‌های نور احتمالاً یکی از مزایای گیاهان شناور مثل عدسک آبی باشد (Stewart et al., 2020).

بر اساس داده‌های این مطالعه با افزایش شدت نور تکمیلی، زمان دوبرابری عملکرد که یک شاخص مهم در ارزیابی رشد گیاه عدسک آبی می‌باشد، روند نزولی پیدا می‌کند؛ به این معنی که در مدت زمان کمتری میزان عملکرد دوبرابر می‌شود. به نظر می‌رسد عدم وجود بخش‌های غیر سبز (که می‌توانند به عنوان منبع اصلی قندها در گونه‌های دیگر عمل کنند)، همان چیزی که عدسک آبی را تقریباً ۱۰۰٪ خوراکی می‌کند، ممکن است دلیل رشد سریع فرندهای جدید عدسک آبی به عنوان تنها منبع یا منبع اصلی قندها باشد و این افزایش سرعت رشد، کاهش زمان دوبرابری زی توده گونه‌های عدسک آبی را به دنبال خواهد داشت (Zeigler et al., 2015). در مطالعات Nopriani et al., (2014) در *L. minor* و Xu et al., (2016) در گونه *Dunaliella salina* نتایج مشابهی در خصوص تأثیر

افزایش شدت نور بر شاخص مذکور به دست آمد ولی در تحقیقات (Stewart et al., 2020)، اثر شدت نور کم (۵۰) و زیاد (۱۰۰۰) بر زمان دوبرابری عملکرد عدسک آبی گونه *Lemna gibba* معنی‌دار نبود. در همانندی با یافته‌های این آزمایش، گزارش‌های مشابهی از (2018)، (Paolacci et al., 2020) و (2023)، (Lepedus et al.) و (2023)، (Femeena et al.) انتشار یافته است که نشان می‌دهد سرعت رشد تحت تأثیر شدت نور قرار گرفته و با افزایش شدت نور سرعت رشد نیز افزایش یافته است. در تحقیقات (2022)، (Sutuliene et al.) افزودن نور مکمل با شدت ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه به نور طبیعی خورشید در مقایسه با ترکیب ۱۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه و نور طبیعی، شاخص‌های رشد را بهبود بخشید.

کیفیت نور به شدت بر رشد و ارزش غذایی گیاه اثر می‌گذارد (Shao et al., 2021). در مطالعات اخیر اثر طیف نور بر پارامترهای رشدی از جمله عملکرد معنی‌دار نشد، اما باید توجه داشت که در این آزمایش از طیف‌های تکی و از همه نسبت‌های ترکیبی استفاده نشده است. در پژوهش (2022)، (Peterson et al.) با بررسی اثر کیفیت و شدت نور بر رشد گونه *L. minor*، تفاوت معنی‌داری بین اثر طیف‌های قرمزآبی با نسبت‌های ۷۰:۳۰ و ۳۰:۷۰، در دو شدت نور ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بر روی پارامترهای رشدی به‌ویژه سرعت رشد نسبی مشاهده نشد.

نتایج مطالعات (2023)، (Luo et al.) نشان از اثر طیف نور بر عملکرد عدسک دارد ولی طیف‌های مورد استفاده در این آزمایش متفاوت بوده است. در تحقیقات (2019)، (Xu et al.)، کاربرد هم‌زمان طیف قرمزآبی، کارایی جذب را در مقایسه با سایر طیف‌ها افزایش داد و گونه *Spirodela polyrrhiza* تحت طیف‌های مختلف قرمز-آبی (نسبت‌های ۲:۱ و ۴:۱)، کارایی فتوسنتزی و زی‌توده بالاتری در مقایسه با تک‌رنگ و فلورسنت نشان داد. در کل با توجه به نتایج این مطالعه به نظر می‌رسد استفاده از طیف قرمز-آبی به‌ویژه در شاخص‌های کیفی موثرتر از طیف کامل نور می‌باشد. بر اساس مطالعات (2016)، (Kozai) نیز طیف قرمز-آبی به‌تنهایی برای رشد و نمو گیاه کافی می‌باشد. پیک جذب رنگدانه‌های فتوسنتزی در محدوده قرمز و آبی متمرکز شده است (منابع اولیه انرژی برای جذب دی-اکسیدکربن) که دلیل اصلی استفاده از LED مخلوط می‌باشد، در تحقیقات (2020)، (Wojciechowska et al.) نیز تفاوت معنی‌داری در استفاده از مخلوط قرمز و آبی در مقایسه با نور سفید مشاهده نگردید.

اثر شدت نور به‌تنهایی بر محتوای نیتروژن و پروتئین معنی‌دار نشد. در گیاهان C3، افزایش شدت نور، مقدار آنزیم روبیسکو که یک پروتئین محلول است، را افزایش می‌دهد (Walsh et al., 2021). عدم وجود تفاوت معنی‌دار در این آزمایش می‌تواند توضیحی برای پروتئین خام نسبتاً پایدار در مطالعه حاضر باشد، زیرا شدت نور فقط کمی افزایش یافته است (با تفاوت ۱۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه). در تحقیقات (2022)، (Peterson et al.) با افزایش شدت نور از ۵۰ به ۱۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه و در پژوهش Martindale & Bowes, (1996)، با افزایش شدت نور از ۲۰۰ به ۴۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه نیز شرایط مشابه و افزایش کمی در میزان پروتئین زی‌توده حاصل شد. همانطور که در بالا توضیح داده شد، به نظر می‌رسد افزایش قابل توجه شدت نور منجر به افزایش محتوای پروتئین خواهد شد.

در مطالعه اخیر، اثر طیف نور بر محتوای پروتئین و نیتروژن معنی‌دار شد. نتایج این مطالعه درباره تأثیر طیف نور بر درصد نیتروژن زی‌توده با نتایج ارائه شده توسط مطالعات (1987)، (Landolt et al.) مطابقت دارد. نور یک عامل مهم تنظیم‌کننده مرفولوژی، فیزیولوژی و محتوای شیمیایی گیاه است (Kami et al., 2010). در تطابق با نتایج آزمایش انجام شده، (2020)، (Metsoviti et al.) یافته‌های مشابهی داشتند. در تحقیقات (2021)، (Sui et al.) در *Dunaliella salina* اثر متقابل طیف و شدت نور روی مقدار پروتئین معنی‌دار بود. Choi

(2015), *et al.* نشان دادند که کیفیت نور در ساخت و تجمع پروتئین در گیاه تاثیرگذار است و تیمار نوری قرمز و قرمز-آبی سبب سنتز اسید آمینه و افزایش پروتئین می‌گردد.

از نظر محتوای فیبر خام تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای نوری مشاهده نگردید ولی در شدت نور بالاتر میزان فیبر تولیدی بالاتر بود. نور برای فتوسنتز ضروری است و مواد آلی ناشی از فتوسنتز، ماده خام مهمی برای سنتز دیواره سلولی می‌باشند. نور تجمع بخش‌های فیبری دیواره سلولی مثل سلولز، همی سلولز و پکتین را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Xu et al., 2024). یکی از پارامترهای مهم در جیره غذایی دام و طیور محتوای فیبر کم است، عدسک آبی در مقایسه با محصولاتی مثل سویا و ذرت با حدود ۵۰ درصد فیبر، حاوی فیبر کمی می‌باشد که آن را برای استفاده در رژیم غذایی دام و طیور، به عنوان مکمل و یا جایگزین مناسب می‌سازد (Leng et al., 1995; Islam, 2002). طبق بررسی‌های (Leng et al., 1995)، محتوای فیبر زی‌توده عدسک آبی تحت شرایط ایده‌آل حاوی ۵ تا ۱۵ درصد (وزن خشک) می‌باشد. میزان فیبر تولیدشده در مطالعه حاضر نیز در این دامنه قرار داشت. مطالعات محدودی در زمینه اثر فاکتورهای مختلف محیطی به ویژه شدت و کیفیت نور بر میزان فیبر زی‌توده عدسک آبی انجام گرفته است. در تحقیقی مشابه بر روی گونه‌ای جلبک سبز (*Chlorella vulgaris*)، با کاربرد سطوح مختلف نور از ۱۳۰ تا ۵۲۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه و طیف‌های قرمز و سفید تفاوت معنی‌داری در محتوای فیبر زی‌توده مشاهده نگردید (Metsovit et al., 2020).

همچنین اگرچه اثر شدت و طیف نور بر حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم دو (Fv/Fm) معنی‌دار نبود و تیمارها از نظر مقایسه میانگین در یک گروه آماری قرار گرفتند. Fv/Fm یکی از شاخص‌های مهم در تعیین فعالیت فتوسنتزی گیاه است و در گیاهان سالم مقدار آن بیش از ۰/۸ می‌باشد و تحت شرایط تنش از جمله بازدارندگی نوری کاهش پیدا می‌کند (Lan et al., 2010). شاخص مذکور در تمامی تیمارهای استفاده شده در این پژوهش بیش از ۰/۸ بوده و می‌تواند موید این نکته باشد که گیاهان کشت شده تحت این مقدار نور (نور تکمیلی + نور طبیعی گلخانه) تحت تنش نوری نبوده‌اند.

طبق تحقیقات (Fraszczak, et al., 2014) توزیع طیفی در استفاده از منابع نوری LED برای هر گونه گیاهی می‌تواند مختص آن گونه باشد و باید برای هر گونه به طور جداگانه به شرایط بهینه آن دست یافت. بسته به گونه و فرآیندهای سازگاری نوری که کارایی فتوسنتز را بهبود می‌بخشند تغییرات در محتوا و نسبت‌های کلروفیل نیز متفاوت است (Lichtenthaler et al., 1981).

در این پژوهش، اثر شدت نور بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی معنی‌دار نگردید. ظرفیت ذخیره‌سازی عدسک آبی برای قندهای تولید شده از طریق فتوسنتز، احتمالاً به دلیل فقدان بخش‌های غیرسبز که در سایر گونه‌های گیاهی به عنوان مخزن اصلی قندها عمل می‌کنند، محدود شده است (Adams et al., 2018). این ویژگی شاید توضیحی برای نبود تفاوت معنی‌دار در شدت نورهای مورد مطالعه باشد. ظرفیت فتوسنتزی و کلروفیل مفاهیمی مرتبط با هم هستند، در تطابق با نتایج این تحقیق، (Stewart et al., 2020) نیز نشان دادند حداکثر ظرفیت فتوسنتزی با افزایش شدت نور از ۱۰۰ تا ۷۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع در ثانیه افزایش نمی‌یابد که با محدودیت مخزن سازگار است (Adams et al., 2018). با این حال، قابل توجه است که با وجود نبود بخش ذخیره‌ای، کاهشی در سرعت رشد اتفاق نمی‌افتد و با افزایش شدت نور، سرعت رشد افزایش می‌یابد. در واقع رشد به تولید فرزند جدید و نه ذخیره قندها در فرندهای موجود اختصاص می‌یابد (Sree et al., 2015).

اگرچه اثر شدت نور بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در پژوهش اخیر از نظر آماری معنی‌دار نشد ولی در تطابق با مطالعات Peterson et al., (2022) در دو گونه عدسک آبی مورد مطالعه، با افزایش شدت نور، محتوای کلروفیل a، کاهش یافت که ممکن است نوعی استراتژی سازگاری در شدت نور بالا، برای حفاظت از گیاه در برابر آسیب ناشی از اکسیداسیون نوری نیز باشد (Hendry et al., 1993).

علاوه بر شدت نور، در این تحقیق بین طیف‌های نوری به‌کاربرده شده نیز، تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نگردید که ممکن است ناشی از نوع و نسبت طیف نور ترکیبی باشد و در طیف‌های تکی یا نسبت‌های دیگر نتایج متفاوت باشد (Peterson et al., 2022). این

موضوع همچنین توسط Zhong et al., (2021) نشان داده شده است که هیچ تفاوت معنی‌داری در محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در گونه *S. polyrhiza*، هنگام کشت در طیف‌های مختلف، مشاهده نگردید.

نتیجه‌گیری نهایی:

نتایج این پژوهش نشان داد تیمار نوری بالاتر یعنی ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه، بهترین شدت نور تکمیلی در اثر بر شاخص‌های رشدی مورد بررسی بود. همچنین طبق یافته‌های این پژوهش، اثر کیفیت نور بر پارامترهای کمی مانند وزن و سرعت رشد معنی‌دار نشد ولی درصد نیتروژن و محتوای پروتئین گیاه تحت تأثیر طیف نوری قرار گرفته است و طیف قرمز- آبی سبب افزایش محتوای پروتئین در مقایسه با طیف سفید گردید.

منابع

- Adams, W. W. III, Stewart, J. J., and Demmig-Adams, B. (2018). "Photosynthetic modulation in response to plant activity and environment," in *The Leaf: A Platform for Performing Photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration*, Vol. 44, eds W. W. Adams III and I. Terashima (Cham: Springer), 493–563. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93594-2_18.
- Appenroth, K. J., Sree, K.S., Bog, M., Ecker J., Seeliger C, Böhm V., Lorkowski, S. Sommer K., Vetter W., Tolzin-Banasch, K., Kriwse R., Leiterer, M., Dawczynski, C., Liebisch G. & Jahreis, G. (2018). Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus *Wolffia* (Lemnaceae) as Human Food. *Food Front. Chem.* 6: 483. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00483>
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*. 23:112-121
- Artetxe, U., García-Plazaola, J. I., Hernández, A., & Becerril, J. M. (2002). Low light grown duckweed plants are more protected against the toxicity induced by Zn and Cd. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(10), 859-863.
- Bantis, F., Koukounaras, A., Siomos, A. S., Fotelli, M. N., & Kintzonidis, D. (2020). Bichromatic red and blue LEDs during healing enhance the vegetative growth and quality of grafted watermelon seedlings. *Scientia Horticulturae*, 261:109000. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109000>
- Casal, J. A., Vermaat, J. E., Wiegman, F. (2000). A test of two methods for plant protein determination using duckweed. *Aquat. Bot.* 67, 61-67. <https://doi.org/10.1016/S0304-3770%2899%2900093-5>
- Choi, H. G., Byoung, Y. M. & N, J. Kang. (2015). Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. *SCIENTIA Horticulturae* Kang, 189:22-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.022>
- Coughlan, N.E.; Walsh, É.; Bolger, P.; Burnell, G.; O'Leary, N.; O'Mahoney, M.; Paolacci, S.; Wall, D.; Jansen, M.A. (2022). Duckweed bioreactors: Challenges and opportunities for large-scale indoor cultivation of Lemnaceae. *J. Clean. Prod.* 336, 130285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130285>
- Femeena, P. V., Roman, B., & Brennan, R. A. (2023). Maximizing duckweed biomass production for food security at low light intensities: Experimental results and an enhanced predictive model. *Environmental Challenges*, 11, 100709. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2023.100709>
- Frąszczak, B., Golcz, A., Zawirska-Wojtasiak, R., & Janowska, B. (2014). Growth rate of sweet basil and lemon balm plants grown under fluorescent lamps and LED modules. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 13(2), 3-13.
- Gallego, L. M., Chien, Y. H., & Angeles Jr, I. P. (2022). Effects of light source and photoperiod on growth of duckweed *Landoltia punctata* and its water quality. *Aquaculture Research*, 53(2), 398-408. <https://dx.doi.org/10.1111/are.15581>
- Givens, S. R., Del Moro, D. S., Parker, S. E., Renny, A. G., Sams, C. E., & Walters, K. J. (2023). Light intensity during green-leaf butterhead lettuce propagation influences yield and carotenoids at harvest. *Horticulturae*, 9(2), 223. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020223>
- Goopy, J. P. & Murray P. J. (2003). A Review on the Role of Duckweed in nutrient Reclamation and as a source of animal Feed. *J. Animal Feed. J. Anim Sci.* Vol. 16, No. 2:297-305. <http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2003.297>

- Hendry, G.A.F.; Price, A.H. (1993). Stress Indicators: Chlorophylls and Carotenoids. In Hendry, G.A.F., and Grime, J.P., Eds., *Methods in Comparative Plant Ecology*, Chapman Hall, London, 148–152. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-1494-3>.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agric. Exp. Stn. Circ.* 347, 1-32.
- Hunt, R. (1978). *Plant growth analysis studies in biology*, pp. 67. Edward Arnold Ltd, London, 37.
- Islam, K. (2002). Feasibility of duckweed as poultry feed-A review. *Indian Journal of Animal Sciences*, 72, 486–491.
- Jiang, C., Johkan, M., Maruo, T., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ebihara, Nakaminami, A. (2017). Effect of supplemental far-red light with blue and red LED lamps on leaf photosynthesis, stomatal regulation and plant development of protected cultivated tomato, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.67>
- Kaiser, E., Correa Galvis, V., & Armbruster, U. (2019). Efficient photosynthesis in dynamic light environments: a chloroplast's perspective. *Biochemical Journal*, 476(19), 2725–2741. <http://doi.org/10.1042/BCJ20190134>
- Kami C, Lorrain S, Hornitschek P, Fankhauser C. Light-regulated plant growth and development. *Curr Top Dev Biol.* 2010;91: 29-66. [http://dx.doi.org/10.1016/S0070-2153\(10\)91002-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0070-2153(10)91002-8)
- Kozai, T. (2013). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 89(10), 447–461. <http://dx.doi.org/10.2183/pjab.89.447>
- Kozai, T. (2016). Why LED lighting for Urban Agriculture? In: *LED lighting for urban agriculture*. Springer. 4-10. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_1
- Lan, S. B., Wu, L., Zhang, D. L., Hu, C. X., Liu, Y. D., (2010). Effects of drought and salt stresses on man-made cyanobacterial crusts. *Eur. J. Soil Biol.* 46, 381–386. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.08.002>
- Landolt, E. & Kandeler, R. (1987). *Biosystematic Investigations in the Family of Duckweeds (Lemnaceae), the Family of Lemnaceae; A Monographic Study; Geobotanisches Institut ETH: Zürich, Switzerland, Volume 4.*
- Lasfar, S., Monette, F., Millette, L., Azzouz, A. (2007). Intrinsic growth rate: A new approach to evaluate the effects of temperature, photoperiod and phosphorus-nitrogen concentrations on duckweed growth under controlled eutrophication. *Water Res.*, 41, 2333–2340. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.059>
- Leng, R. A., Stambolie, J. H., & Bell, R. (1995). Duckweed-a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*, 7(1), 36.
- Lepeduš, H., Vidaković-Cifrek, Ž., Šebalj, I., Antunović Dunić, J., & Cesar, V. (2020). Effects of low and high irradiation levels on growth and PSII efficiency in *Lemna minor* L. *Acta Botanica Croatica*, 79(2), 185–192. <http://dx.doi.org/10.37427/botcro-2020-016>
- Les, D. H., Landolt, E. & Crawford, D. J. (1997). Systematics of the Lemnaceae (duckweeds): Inferences from micromolecular and morphological data, *Plant Systematics and Evolution*, 204, 161–177.
- Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C., Doll, M., Fietz, H. J., Bach, T., Kozel, U. (1981). Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynthesis research*, 2 (2), 115–141. <https://doi.org/10.1007/BF00028752>.
- Luo, J., Chien, Y. H., Thephahudee, W., Kitikiew, S., & Kantha, P. (2023). The Effect of Light-Emitting Diodes (LEDs) on the Development of Duckweed (*Lemna minor*) in Co-Culture with Red Tilapia (*Oreochromis spp.*). *Journal of Fisheries and Environment*, 47(2), 99–115.
- Martindale, W.; Bowes, G. The effects of irradiance and CO₂ on the activity and activation of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in the aquatic plant *Spirodela polyrrhiza*. *J. Exp. Bot.* 1996, 47, 781–784.
- McClure, J. W., & Alston, R. E. (1966). A chemotaxonomic study of Lemnaceae. *American Journal of Botany*, 53(9), 849–860. <https://doi.org/10.2307/2439806>
- Metsoviti, M. N., Papapolymerou, G., Karapanagiotidis, I. T., & Katsoulas, N. (2019). Effect of light intensity and quality on growth rate and composition of *Chlorella vulgaris*. *Plants*, 9(1), 31. <http://dx.doi.org/10.3390/plants9010031>
- Nopriani, U., Karti, P. D. M. & Prihantoro, I. (2014). Productivity of duckweed (*Lemna minor*) as alternative forage feed for livestock in different light intensity. *Journal Ilmu Ternak dan Veteriner*. Vol 19, No. 4, 272–286. <http://dx.doi.org/10.14334/jitv.v19i4.1095>
- Paolacci, S.; Harrison, S.; Jansen, M.A.K. (2018). The invasive duckweed *Lemna minuta* Kunth displays a different light utilization strategy than native *Lemna minor* Linnaeus. *Aquat. Bot.* 146, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2018.01.002>

Pasos-Panqueva, J., Baker, A., & Camargo-Valero, M. A. (2024). Unravelling the impact of light, temperature and nutrient dynamics on duckweed growth: A meta-analysis study. *Journal of Environmental Management*, 366, 121721. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121721>

Peterson, F., Demann, J., Restemeyer, D., Olfs, H. W., Westendarp, H., Appenroth, K. J., Ulbrich, A. (2022). Influence of Light Intensity and Spectrum on Duckweed Growth and Protein in a Small-Scale, Re-circulating Indoor Vertical Farm. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants11081010>

Roach, T., and Krieger-Liszkay, A. (2019). Photosynthetic regulatory mechanisms for efficiency and prevention of photo-oxidative stress. *Annual Plant Reviews Online*, 2(1), 1-34. <https://dx.doi.org/10.1002/9781119312994.apr0666>

Shao, M., Liu, W., Zha, L., Zhou, C., Zhang, Y., Li. B. (2021). Altering light-dark cycle at pre-harvest stage regulated growth, nutritional quality, photosynthetic pigment content of hydroponic lettuce. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43, 1-9. <https://dx.doi.org/10.1007/s11738-020-3187-w>

Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2011). Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 605-609. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02683>

Sree, K. S., Sudakaran, S., and Appenroth, K. J. (2015). How fast can angiosperms grow? Species and clonal diversity of growth rates in the genus *Wolffia* (Lemnaceae). *Acta Physiol. Plant.* 37:204. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1951-3>.

Stewart, J.J.; Adams, W.W.; Escobar, C.M.; López-Pozo, M.; Demmig-Adams, B. (2020). Growth and Essential Carotenoid Micronutrients in *Lemna gibba* as a Function of Growth Light Intensity. *Front. Plant Sci*, 11, 480. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00480>

Stomp, A. M., (2005). The duckweeds: A valuable plant for biomanufacturing, *Biotechnol. Anu. Rev.* 11, 69-99. [https://doi.org/10.1016/S1387-2656\(05\)11002-3](https://doi.org/10.1016/S1387-2656(05)11002-3)

Strzałek, M. & Kufel, L. (2021). Light intensity drives different growth strategies in two duckweed species: *Lemna minor* L. and *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleiden. *PeerJ*. 12698 <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.12698>

Sui, Y., Harvy, P. J. (2021). Effect of light intensity and wavelength on biomass growth and protein and amino acid composition of *Dunaliella salina*. *Foods*, 10(5), 1018. <https://doi.org/10.3390/foods10051018>

Sutulienė, R., Laužikė, K., Pukas, T., & Samuolienė, G. (2022). Effect of light intensity on the growth and antioxidant activity of sweet basil and lettuce. *Plants*, 11(13), 1709. <http://doi.org/10.3390/plants11131709>

Torri, S., (2017). Impact of light spectra on quality aspects of selected species of Lemnaceae. Master thesis. Austria; BOKO, University. Institute of Agricultural Sciences.

Walsh, É.; Paolacci, S.; Burnell, G.; Jansen, M.A.K. The importance of the calcium-to-magnesium ratio for phytoremediation of dairy industry wastewater using the aquatic plant *Lemna minor* L. *Int. J. Phytoremediat.* 2020, 22, 694–702.

Wang, W., Wu, Y., Yan, Y., Ermakova, M., Kerstetter, R. and Messing, J., (2010). “DNA barcoding of the *Lemnaceae*, a family of aquatic monocots”, *BMC Plant Biol.*, 10, 205. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2229-10-205>

Wendeou, S., Alina, M., Adjovi, E. & Mama, D. (2013). Influence of Salinity on Duckweed Growth and Duckweed Based Wastewater Treatment System. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 993-999. <http://doi.org/10.4236/jwarp.2013.510103>

Wojciechowska, R., Kołton, A., Długosz-Grochowska, O., Kunicki, E., Mrowiec, K., & Bathelt, P. (2020). LED lighting affected the growth and metabolism of eggplant and tomato transplants in a greenhouse. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.038>

Xu, Y. Iskandar, M. Ibrahim, Harvy, P. J. (2016). The influence of photoperiod and light intensity on the growth and photosynthesis of *Dunaliella salina* (chlorophyta) CCAP 19/30. *Plant Physiology and Biochemistry*, 106:305-315. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.021>

Xu, Y. L., Tan, L., Guo, L., Yang, G. L., Li, Q., Lai, F., He, K. Z., Jin, Y., Du, A., Fang, Y. (2019). Increasing starch productivity of *Spirodela polyrhiza* by precisely control the spectral composition and nutrients status. *Ind. Crops Prod.* 134, 28-291 <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.002>.

Xu, Y. H., Yang, C. N., Zhang, Y. P., Cao, Q., Wan, C. P., Chen, C. Y. (2024). Blue light treatment delays postharvest ripening of kiwifruit by suppressing ethylene biosynthesis, starch degradation, and cell wall metabolism. *Lwt Food Sci. Technol.* 199, 10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116105>.

Yin, Y.; Yu, C.; Yu, L.; Zhao, J.; Sun, C.; Ma, Y.; Zhou, G. (2015). The influence of light intensity and photoperiod on duckweed biomass and starch accumulation for bioethanol production. *Bioresour. Technol*, 187, 84–90. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.097>

- Zheng, Y., Mai, B., Wu, R., Feng, Y., Sofo, A., Ni, Y., ... & Xu, J. (2011). Acclimation of winter wheat (*Triticum aestivum*, cv. Yangmai 13) to low levels of solar irradiance. *Photosynthetica*, 49(3), 426-434. <https://doi.org/10.1007/s11099-011-0055-6>
- Zhong, Y.; Wang, L.; Ma, Z.; Du, X. Physiological responses and transcriptome analysis of *Spirodela polyrhiza* under red, blue, and white light. *Planta* 2021, 255, 11. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00425-021-03764-4>.
- Ziegler, P.; Adelmann, K.; Zimmer, S.; Schmidt, C.; Appenroth, K.J. (2015). Relative in vitro growth rates of duckweeds (*Lemnaceae*)—The most rapidly growing higher plants. *Plant Biol.* 17, 33–41. <https://doi.org/10.1111/plb.12184>

Extended Abstract

Introduction: Due to increase of world population and demand for food, food security may be the main challenge of humanity in the future. In recent years, the use of duckweeds, has attracted global attention due to many features compared to the conventional cereal and grain crops. Studies have shown that these aquatic plants have the potential to be a useful alternative for human food and animal feed due to their great nutritional content. Not much research has been conducted on the climatic requirements for optimal production of duckweed biomass. light is one of the essential climatic factors for plant growth. The light saturation point varies depending on factors such as temperature and species. Therefore, considering the effect of light on the growth of plants and the limitation of light in winter in greenhouses, the main objective of this study was to investigate the effect of different spectra and intensities of supplementary light on the quantitative and qualitative growth of *Lemna minor*.

Method: An experiment was conducted on January 2023, in a research greenhouse of the Department of Horticultural Sciences, University of Tehran, Karaj, Iran. Plant samples of *Lemna minor* species were collected from the natural habitats located in Gilan Province (a coastal province in the north of Iran) and then were brought to a greenhouse for propagating. One-quarter Hoagland's solution was used as the culture medium. In each pot (22 cm long×22 cm wide×20 cm depth), 5g fresh biomass of species was transferred. water temperature and air temperature were 18 °C and 24 °C, respectively. Natural greenhouse light (Base light) at 1 p.m was 90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Experimental treatments included supplemental LED light in white, red-blue spectra in ratios of 1:2 and 2:1 and two light intensity levels of 150 and 250 $\mu\text{mole m}^{-2}\text{s}^{-1}$. At the end of the cultivation period, some of quantitative and qualitative traits of the duckweed plant such as fresh weight, dry matter, linear growth rate (LGR), relative growth rate (RGR), yield doubling Time (DT), nitrogen content (N), crude protein content and crude fiber were analyzed.

This experiment was a factorial design based on randomized complete block in three replications. Statistical analysis of the obtained data was conducted using SAS software Version 9.4. The Duncan multiple test was used to compare means at 0.05 level of probability.

Result and DISCUSSION: The results showed that the effect of light intensity on growth traits was more effective than the light spectrum. Fresh Weight and dry matter accumulation differed between light intensities. Also biomass productivity or linear growth rate, relative growth rate and yield doubling time was significantly different ($p<0.01$) between studied light intensities and growth rate increased with increasing light intensity. Our finding indicated that there is no significant difference among spectra on mentioned traits

Additionally, the interaction effect of spectrum and light intensity on nitrogen percentage and protein content of biomass was significant. The effect of spectrum and supplemental light intensity on other studied traits was not significant. The findings of this study confirmed that increasing light intensity improves the biomass quantity of duckweed.

Also, the use of red-blue spectra with ratios of 1:2 and 2:1 increased the crude protein content of the biomass compared to the white spectrum.

Understanding the complex relationship between light parameters and duckweed physiology will help to achieve appropriate light conditions for sustainable production and reduce dependence on costly sources of animal feed and human protein.

This small-scale experiment was conducted to investigate one of the important factors in increasing the quantitative and qualitative growth of duckweed., in order to optimize the production of this species further research and careful consideration must be given to key factors controlling duckweed biomass productivity including light, temperature, nutrient supply and the combination of different light and nutritional regimes together.

Conclusions

according to the results of this study, it seems that the use of blue-red spectrum is sufficient to improve growth and development, and especially in qualitative indices, this spectrum is more effective than the full spectrum of light. Also The best supplemental light intensity in the growth indices studied was the higher lighting treatment. the results of present research reveal the importance of optimizing the quality and intensity of light in order to produce duckweed nutritional biomass with.

مجله علمی پژوهشی