Journal of Vegetables Sciences, Spring & summer 2025, Vol 9, No 17(1), Pages 57-70

doi: 10.22034/iuvs.2024.2014335.1327 Article Type: Research Online ISSN: 2676-4822

Effects of different supplemental light spectra on yield and quality of potato minitubers (*Solanum tuberosum* cv. Agria) in an aeroponic system

Zahra Mirzakhani[1], Rahim Barzegar*[2], Sadegh Mousavi-Fard[2], Davoud Hassanpanah kolur[3], Sasan Aliniaeifard[4]

1- PhD student, Department of Horticultural Science, University of Shahrekord, Iran
2- Associate Professor, Department of Horticultural Science, University of Shahrekord, Iran
3- Associate Professor, Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Ardabil, Iran
4- Associate professor, Department of Horticultural Science, Abureyhan College, University of Tehran, Iran

***Corresponding author:** barzegar@sku.ac.ir

(**Received:** 27 October 2023 **Revised:** 12 November 2023 **Accepted:** 28 April 2024)

Extended Abstract

1. **Introduction:** The potato (Solanum tuberosum L.) is among the top five crops globally, serving as a primary food source for over one billion people worldwide. However, utilizing vegetative propagation with whole or cut tubers introduces various contaminations, resulting in reduced yields and quality. On the other hand, the large tubers produced through this method often need to be divided into smaller pieces to achieve the ideal weight range of 50 to 60 grams. Besides the risk of spreading pathogens, cutting the tubers requires additional time, financial resources, and labor. Because potato tuber production is influenced by short daylight conditions, tuber formation primarily occurs towards the end of the year when daylight hours and light intensity decrease. By incorporating an aeroponic system with supplementary lighting that includes monochromatic or a mix of essential light spectrums in different proportions, viable and effective methods are available for producing micro-tubers or improving their quality. Therefore, this ongoing study aims to assess how various LED light spectrums impact both the quantity and quality of Agria cultivar potato minitubers..
2. **Materials and methods**: To assess the impact of various supplemental lights on the yield and quality of minitubers from the Agria cultivar, an experiment was carried out using a completely randomized design with three replications. In vitro potato seedlings were prepared and then planted in an aeroponic system. LED lamps emitting different combinations of red (R), blue (B), white (W), and far-red (Fr) light were used either individually or in combination with other spectra. The study involved eight different treatment levels: T1 (100R), T2 (100R+Fr), T3 (75R:25B), T4 (75R:25B+Fr), T5 (50R:50B), T6 (50R:50B+Fr), T7 (W), T8 (W+Fr), and natural greenhouse light was used as the control treatment (T9). The light intensity utilized was 100 µmol m^{-2} s^{-1}, with far-red light making up 10% of the total supplemental light in treatments where it was applied.
3. **Results and Discussion**: The study's findings demonstrate the significant impact of different light spectrums on various characteristics of potato minitubers. These characteristics include the number and weight of minitubers, dormancy duration, sprouting minituber count and diameter, as well as dry matter content and firmness .Using all light spectrums increased both the quantity and weight of minituber yield, with treatments T1 and T7 showing the most significant improvements... Incorporating far-red light as supplemental lighting proved effective compared to the control, although it did not enhance the minituber quality indicators and may have had some adverse effect. The supplementary light also prolonged minituber dormancy compared to the control, but adjusting the blue to red light ratio showed promise in reducing dormancy. The highest firmness levels were observed in the white light treatment (T7), while the control treatment had the lowest firmness. Applying supplementary light negatively affected the dry matter content of the minitubers. The control treatment showed the highest dry matter content at 17.5%, while the T7 treatment had the lowest content. The use of supplemental lighting resulted in a decrease in the number of active sprouting minitubers. The control group had the highest number of active sprouting minitubers, with a total of two, while the T7 treatment had the lowest, with only one active sprouting minituber. Despite a general reduction in sprout diameter due to the supplemental light, the T5 treatment recorded the largest sprout diameter at 4.84 mm.
4. **Conclusion**: The findings of the study demonstrated that the use of various supplementary light spectra increased both the number and weight of minitubers per plant. Furthermore, this method prolonged the dormancy period of the minitubers and enhanced the firmness of the microtubers in all light treatments

compared to the control group. In summary, the research suggests that the application of supplementary light, specifically white light excluding far-red light or 100% red light without far-red light, can yield positive outcomes in terms of minituber quantity, performance, and firmness. However, addressing the issue of extended dormancy before planting is crucial. It is advisable to either eliminate or reduce the far-red spectrum in supplemental lighting to less than 5%.

Keywords**:** Minituber dormancy, Far-red light, Supplementary light, Minituber firmness.

Citation: Mirzakhani, Z., Barzegar, R., Musavifard, S. S., Hassanpanah Kolur, D. & Aliniaeifard, S. (2025). Effects of different supplemental light spectra on yield and quality of potato minitubers (*Solanum tuberosum* cv. Agria) in an aeroponic system. Journal of Vegetables Sciences, 17(1), 57-70. doi:10.22034/iuvs.2024.2014335.1327

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights. granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

دوفصلنامه علمی علوم سبزی‌ها، سال۹ ، دوره ۱۷، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحات (۷۰-۵۷)

دانشگاه ایلام شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۸۲۲ نوع مقاله: پژوهشی doi: 10.22034/iuvs.2024.2014335.1327

تأثیر طیف‌های مختلف نور تکمیلی بر عملکرد و کیفیت مینی‌تیوبر سیب‌زمینی (*Solanum Tuberosum* cv. Agria) در سیستم هواکشت

زهرا میرزاخانی[۱]، رحیم برزگر*[۲]، صادق موسوی فرد[۲]، داود حسن پناه کلور[۳]، ساسان علی نیایی فر[۴]

۱ - دانشجوی دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲-دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- دانشیار بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران

۴-دانشیار گروه علوم باغبانی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*مسئول نویسنده: barzegar@Sku.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹)

چکیده

به منظور بررسی اثر طیف‌های مختلف نور LED بر تعداد و کیفیت مینی‌تیوبر سیب زمینی رقم آگریا، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۴۰۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. گیاهچه‌های کشت بافتی سیب زمینی رقم آگریا با تراکم ۲۰ بوته در متر مربع در سیستم هواکشت مستقر شدند. از لامپ‌های LED در نسبت‌های مختلفی از نور قرمز، آبی، نور سفید و قرمز دور به تنهایی یا در ترکیب با طیف‌های دیگر استفاده شد. بر اساس نتایج، اعمال طیف‌های مختلف نوری تأثیر معنی‌داری بر صفات عملکردی و همچنین کیفیت مینی‌تیوبر داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که استفاده از تمام طیف‌های نوری باعث افزایش راندمان مینی‌تیوبر (تعداد و وزن) شد. بیشترین افزایش عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نور قرمز و تیمار نور سفید بدون قرمز دور مشاهده شد. استفاده از نور قرمز دور اگر چه نسبت به شاهد موثر و مفید بود اما تأثیر مثبتی بر شاخص‌های مرتبط با کیفیت مینی‌تیوبر نداشت یا اینکه تأثیر منفی داشت. استفاده از نور تکمیلی سبب افزایش دوره خواب مینی‌تیوبرها نسبت به شاهد شد با این وجود افزایش نسبت نور آبی به قرمز توانست دوره خواب غده‌ها را کاهش دهد. بیشترین و کمترین سفتی مینی‌تیوبر که شاخص مهمی درکیفیت مینی‌تیوبر می‌باشد، به ترتیب در تیمار نور سفید و تیمار شاهد مشاهده شد. به طور کلی استفاده از نور تکمیلی بویژه نور سفید یا نور قرمز بدون حضور نور قرمز دور و با شدت ۱۰۰ میکرومول دارای بیشترین تأثیر بر افزایش کمیت و کیفیت خواب مینی‌تیوبر بود و از این رو قابل توصیه برای استفاده در گلخانه‌های تولید مینی‌تیوبر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: **سفتی مینی‌تیوبر، خواب مینی‌تیوبر، نور قرمز دور، نور مکمل.**

استناد: میرزاخانی، ز.، برزگر، ر.، موسوی‌فرد، س. ص.، حسن‌پناه کلور، د. و علی‌نیایی‌فر، س. (۱۴۰۴). تأثیر طیف‌های مختلف نور تکمیلی بر عملکرد و کیفیت مینی‌تیوبر سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* cv. Agria) در سیستم هواکشت، علوم سبزی‌ها، ۱۷(۱)، ۷۰-۵۷.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به‌صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

سیب‌زمینی یکی از پنج محصول مهم در جهان است. در سال ۲۰۲۱ سطح زیر کشت این محصول در جهان ۱۶/۸ میلیون هکتار بود که منجر به تولید ۳۸۳ میلیون تن غده شد (FAO., 2023). این محصول غذای اصلی بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان است (Brocic *et al*., 2022).

تکثیر رویشی سیب‌زمینی از طریق غده‌های معمولی منجر به آلودگی‌های شدید و متنوع و نیز افت کیفیت و راندمان و گاهی تخریب کامل ژرم‌پلاسم می‌شود (Li *et al*., 2020). در کشور ما تقریباً تمام غده‌های سیب‌زمینی بذری آلوده به ویروس هستند و به ندرت می‌توان مزرعه‌ای یافت که عاری از عوامل ویروسی باشد (Vahid Taze-Kand & Shahryari, 2023). تکه کردن غده‌ها علاوه بر انتقال عوامل بیماری‌زا، نیازمند زمان، هزینه و نیروی کار است (Li *et al*., 2020). مینی‌تیوبر سیب‌زمینی، غده‌های بذری کوچک و عاری از عوامل بیماری‌زا هستند که در یک محیط کنترل شده، از گیاهچه‌های کشت بافتی تولید می‌شوند. به دلیل عاری بودن از عوامل بیماری‌زا و اندازه‌ی مناسب، این غده‌های کوچک می‌توانند جایگزین خوبی برای غده‌های بذری معمولی در زراعت سیب‌زمینی باشند (Brocic *et al*., 2022).

راندمان تولید مینی‌تیوبر سیب زمینی در خاک به طور متوسط دو تا چهار غده برای هر بوته است. که صرف نظر از این راندمان پایین، در اکثر مواقع غده‌ها بدشکل یا در اندازه نامناسب هستند و تولید کننده هیچ دخالتی در تعیین اندازه غده ندارد (Fouad *et al*., 2018). برای غلبه بر مشکل راندمان پایین تولید مینی‌تیوبر در خاک، کشت بدون خاک مانند هیدروپونیک (آبکشت)، و ایروپونیک (هوا کشت) در ۲۰ سال گذشته به کار گرفته شده‌اند (Cizek & Komarkova, 2022).

مینی‌تیوبرهایی که شکل مرتب، اندازه یکنواخت و کیفیت عالی دارند، می‌توانند به طور مستقیم به عنوان بذر استفاده شوند و قدرت سبز شدن آن‌ها می‌تواند به ۱۰۰٪ برسد (Zhou *et al*., 2022). مینی‌تیوبرهای حاصل از گیاهچه‌های کشت بافتی در کلاس بذر پیش-پایه (Pre-Basic Seed Potato) قرار می‌گیرند که دارای بالاترین کیفیت و قیمت است و با کشت در سال‌های بعد به ترتیب به کلاس‌های S، SE، E، A و B تنزل می‌یابند (Hasanpanah *et al*., 2018). مینی‌تیوبر سیب‌زمینی بر اساس اندازه، شکل، دفرمه بودن، سفتی غده و نیز درصد جوانه‌زنی بعد از شکسته شدن خواب آن‌ها درجه‌بندی می‌شوند (Gamea *et al*., 2009).

طیف‌های نوری می‌توانند رشد، نمو، متابولیسم و مرفولوژی گیاهان را تحت تأثیر قرار دهند و با توجه به ساختار لامپ¬های LED، امکان تولید طول موج‌های خاص، برای تولید هدفمند گیاهان وجود دارد (Islam *et al*., 2021). طیف‌های تولید شده توسط این لامپ‌ها، می‌تواند شامل نور کامل (broad-band) یا سفید تا طیف¬های رنگی خاص(narrow-spectrum) باشد (Zheng & Song, 2019).

اگرچه تحقیقات متنوعی درباره تأثیر طیف‌های نوری مختلف بر شاخص‌های رشد و عملکرد غده سیب زمینی انجام شده است، اما اغلب آن‌ها محدود به تأثیر کیفیت نور بر گیاهان، در شرایط درون شیشه‌ای (*in vitro*) بوده است و این پژوهش اولین پژوهشی است که به بررسی اثر طیف‌های مختلف نور به عنوان نور مکمل بر رشد و عملکرد گیاهچه‌های سیب زمینی در شرایط گلخانه پرداخته است. Asadi و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که نسبت‌های مختلف طیف‌های نوری مورد استفاده برای تولید گیاهچه‌های کشت بافتی سیب‌زمینی بر عملکرد مینی‌تیوبر و رشد بوته بعد ار انتقال به زمین اصلی نیز تأثیر گذار بود به نحوی که با افزایش نسبت نور قرمز به آبی، تعداد مینی‌تیوبرها افزایش ولی اندازه آن‌ها کاهش یافت. نتایج تحقیقات (Chen *et al*., 2020) نیز نشان داد که استفاده از نور آبی به تنهایی سبب کاهش تعداد مینی‌تیوبر و افزایش وزن مینی‌تیوبرها شد و استفاده از طیف‌های نوری

ترکیبی قرمز و آبی یا ترکیب نورهای قرمز و آبی و سبز، گزینه مناسبی برای افزایش تعداد و وزن مینی‌تیوبرها است. این درحالی است که (Zha & Liu 2018) بیان کردند که اثر نسبت‌های مختلف نور بر شاخص‌های رشد گیاهچه‌های سیب زمینی، ممکن استم تناسب با شدت نور، متفاوت باشد. البته در گزارش‌های دیگر ترکیب نور قرمز+آبی و سفید به عنوان ترکیب نور مصنوعی بهینه در سیستم کشت کارخانه گیاهی برای دستیابی به بالاترین عملکرد ریز غده پیشنهاد گردید که این ترکیب نوری می‌تواند با توجه به نوع رقم اندکی متفاوت باشد(Rahman *et al*., 2021).

به دلیل اینکه سیب‌زمینی از نظر غده‌دهی محصولی روزکوتاه است (Hasanpanah *et al*., 2018)، مدت زمان ممکن برای تولید مینی‌تیوبر غالبا محدود به نیمه دوم سال است که هم طول روز و هم شدت نور کاهش می‌یابد. استفاده تلفیقی از سیستم کشت ایروپونیک و نور مکمل با طیف‌های نوری تک رنگ یا ترکیبی از طیف‌های مهم با نسبت‌های مختلف می‌تواند ایده‌ای مناسب و کارگشا جهت تولید مینی‌تیوبرها و یا افزایش کیفیت آنها باشد. بنابراین تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر طیف‌های مختلف نور تکمیلی LED بر عملکرد و کیفیت غده مینی‌تیوبر سیب‌زمینی رقم اگریا انجام شد.

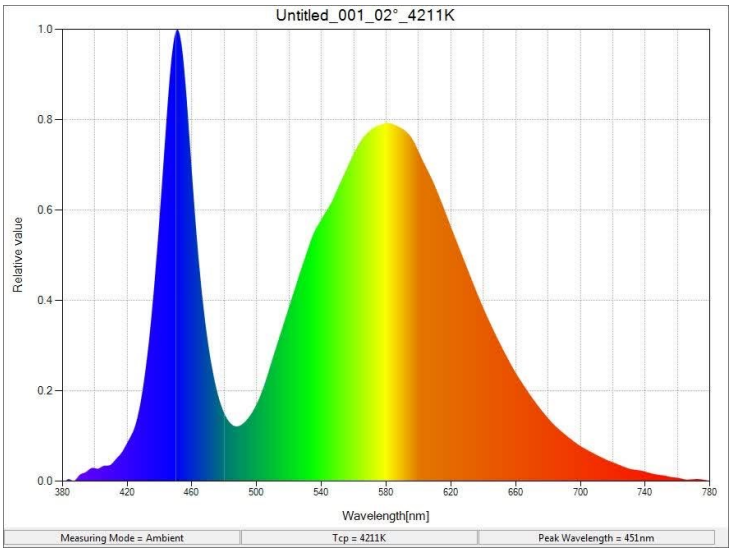
مواد و روش‌ها

این پژوهش، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی با ۹ تیمار نوری در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل هشت تیمار نوری مختلف به صورت نور مکمل (جدول ۱) با شدت ۱۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود و نور طبیعی خورشید به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. نور سفید مورد استفاده در آزمایش دارای دمای رنگ ۴۲۰۰ درجه کلوین بود که اسپکتروگراف آن در (شکل ۱) نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر نور قرمز دور بر شاخص‌های مورد بررسی، در تیمارهای دارای نور قرمز دور، ۱۰ درصد از شدت نور مکمل هر تیمار را نور قرمز دور تشکیل می‌داد. کلیه لامپ‌های LED مورد استفاده، توسط شرکت گرولایت ساخته شد. نور مکمل هر روز با طلوع آفتاب، روشن و با غروب آفتاب، خاموش می‌شد.

جدول ۱- نسبت طیف‌های نوری مورد استفاده در آزمایش

Table 1- The ratio of light spectra used in the experiment

شماره number	تیمار treatment	نسبت نور آبی Blue light ratio	نسبت نور قرمز Red light ratio	نسبت نور سفید White light ratio	وجود نور قرمز دور Presence of far red light
T1	100R	0	100	-	-
T2	100R+fr	0	100	-	+
T3	75R:25B	25	75	-	-
T4	75R:25B+fr	25	75	-	+
T5	50R:50B	50	50	-	-
T6	50R:50B+fr	50	50	-	+
T7	100W	-	-	100	-
T8	100W+fr	-	-	100	+
T9	(Control)	Natural light	Natural light	-	-



شکل ۱- اسپکتروگراف نور سفید

Fig 1- white light spectra

در مرحله‌ی اول، پس از طراحی سازه کشت ایروپونیک، گیاهچه‌های کشت بافتی (سالم سازی شده) رقم آگریا از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل تهیه و با تراکم ۲۰ بوته در متر مربع و با فاصله ۲۰×۲۵ سانتی‌متر به سکوهای کشت منتقل شدند. در این آزمایش دمای روز و شب در گلخانه به ترتیب ۲±۲۳ و ۱±۱۷ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۷۰-۴۰ درصد بود. سیستم گردش محلول غذایی به صورت بسته طراحی گردید و از محلول غذایی مطابق جدول ۲ برای تغذیه بوته‌ها استفاده شد و pH محلول غذایی، ۵/۸ و EC آن ۱/۴ dS/cm در نظر گرفته شد (Tessema *et al*., 2017).

جدول ۲- غلظت نهایی عناصر(میلی‌گرم‌برلیتر) در محلول غذایی مورد استفاده

Table 2- The final concentration of elements (ppm) in the used nutrient solution

Mo	Cu	B	Zn	Mn	Fe	S	Mg	Ca	K	P	N
0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	4	48	40	170	210	31	140

ا

برداشت اولین مینی‌تیوبرها، ۵۵ روز بعد از انتقال گیاهچه‌های کشت بافتی به سیستم ایروپونیک، انجام گرفت. مینی‌تیوبرهایی که طول آنها بین ۲۵-۲۰ میلیمتر بودند، برداشت شد. برداشت غده‌ها هر سه روز یکبار انجام شد. مینی‌تیوبرهای برداشتی، بعد از اندازه-گیری وزن (بر حسب گرم با ترازوی حساس)، لیبل‌گذاری و با ذکر تاریخ برداشت، در دمای ۴ درجه برای آزمایشات بعدی، انبار شد. در این پژوهش مینی‌تیوبرها از نظر تعداد و وزن مینی‌تیوبرها، درصد ماده خشک و سفتی مینی‌تیوبرها و مدت زمان خواب مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از شکستن خواب و محاسبه‌ی این زمان، صفات مربوط به تعداد جوانه‌های فعال و قطر جوانه‌های فعال اندازه‌گیری شد.

میانگین وزن تر و تعداد مینی‌تیوبرها

غده‌های برداشت شده از هر بوته به طور جداگانه شمارش و با ترازوی با دقت ۰/۰۱گرم توزین شد.

درصد ماده خشک مینی‌تیوبر

غده‌های توزین شده، پس از خرد کردن، در پاکت‌های کاغذی، به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار گرفت و پس از خشک شدن کامل،

مجددا توزین شد. درصد وزن خشک از تقسیم وزن خشک بر وزن تر ضربدر ۱۰۰ محاسبه شد.

سنجش سفتی بافت مینی‌تیوبر

اندازه‌گیری سختی بافت مینی‌تیوبرها، با استفاده از پنترومتر دستی و مطابق با روش استاندارد توصیه شده توسط کمپانی سازنده پنترومتر، پس از کالیبره شدن دستگاه و بدون پوست گیری مینی‌تیوبر انجام شد. قطر پروب مورد استفاده ۳/۷۳ میلی‌متر و میزان نفوذ میله‌ی دستگاه ۵ میلی‌متر بود. عدد قرائت شده از پنترومتر به عنوان میزان سختی بافت در نظر گرفته شد.

میانگین روز تا جوانه زنی (مدت زمان خواب غده) و درصد غده‌های جوانه زده

از هر تیمار، ۲۰ غده‌ی هم اندازه که همزمان نیز برداشت شده بودند، انتخاب شد. این غده‌ها در دمای ۷ درجه سانتیگراد، در تاریکی انبار شد. تعداد روز از زمان انبار تا ظهور جوانه غالب غده‌ها (به طول حداقل ۲ میلی متر) یادداشت شد (Gamea *et al.*, 2009). این شاخص به عنوان مدت زمان خواب غده، در نظر گرفته شده و میانگین مدت زمان خواب برای هر تیمار محاسبه شد. درصد غده‌های جوانه زده نیز، برای شناسایی تعداد غده‌های فعال محاسبه گردید. تعداد کل جوانه‌های روی مینی‌تیوبر و تعداد جوانه‌های فعال بلندتر از ۲ میلی‌متر نیز شمارش شد.

قطر جوانه‌های فعال بلندتر از دو میلی‌متر

به منظور سنجش میزان استحکام جوانه درحین کاشت مینی‌تیوبر، از کولیس دیجیتال برای اندازه‌گیری قطر جوانه‌ی غالب استفاده (Gamea et al., 2009) و اعداد حاصل، بر حسب میلی‌متر یادداشت شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

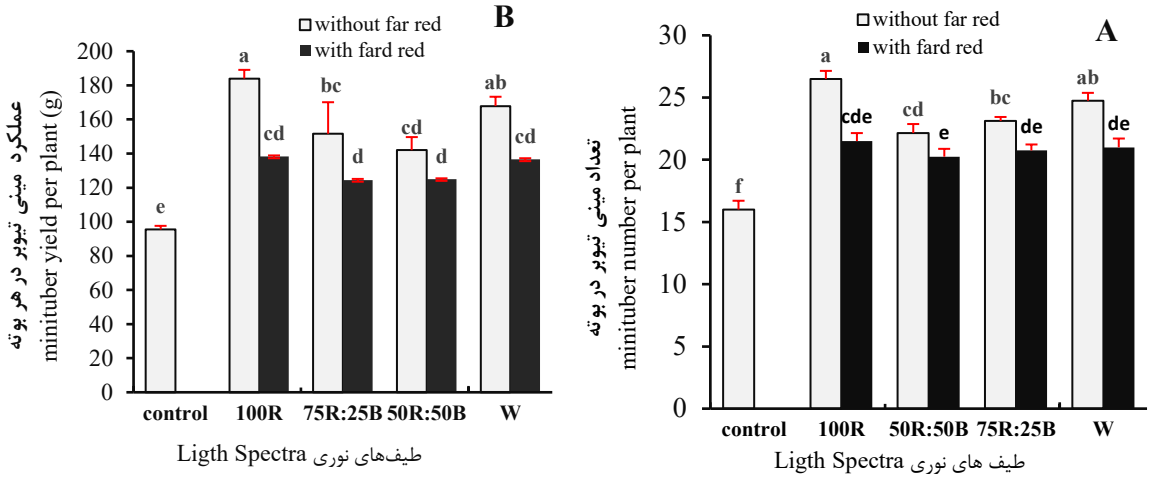
نتایج حاصل، در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه واریانس قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. به منظور انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها از نرم افزار Minitab 21 و برای رسم نمودار از Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد تیمارهای مختلف طیف نوری، بر تمام صفات مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری داشتند.

تعداد و وزن مینی‌تیوبر: بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از نور تکمیلی (لامپ‌های LED) همراه با وجود یا عدم وجود نور قرمز دور (LED ± fr) باعث افزایش تعداد و وزن مینی‌تیوبر نسبت به تیمار شاهد شد. حداقل و حداکثر تعداد مینی‌تیوبر به ترتیب در تیمارهای شاهد و 100_R-fr، به میزان ۱۶ و ۲۶/۵ عدد مشاهده شد (شکل۱- A). کمترین و بیشترین وزن مینی‌تیوبر نیز به ترتیب در تیمار شاهد و 100_R - fr به ترتیب به میزان ۹۹/۵ و ۱۸۴ گرم برداشت شد (شکل ۱- B).

تعداد و وزن مینی‌تیوبرهای برداشتی در کلیه تیمارهای دارای نور مکمل بیشتر از تیمار شاهد بود. این امر به دلیل افزایش شدت نور در طول روز و به تبع آن افزایش میزان فتوسنتز، تولید مواد فتوسنتزی و افزایش سرعت تشکیل و رشد مینی‌تیوبرها می‌گردد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد استفاده از نور مکمل سبب افزایش شدت نور لحظه‌ای شده و این افزایش بخصوص در ساعات صبح و عصر قابل توجه است. به عنوان مثال در روز ۱۴ آذر، مجموع نور طبیعی روزانه ۶/۷۵ و مجموع نور روزانه حاصل از نور طبیعی و مکمل ۹/۶ mol/day بود (شکل ۲) که نشان می‌دهد نور مکمل سبب افزایش ۴۲/۵ درصدی مجموع نور روزانه شد. کربوهیدرات‌های تولید شده توسط بوته‌های سیب‌زمینی منبع مواد مهمی برای رشد بوته‌ها و مینی‌تیوبرها هستند. همچنین مشخص شده است غده‌سازی از طریق در دسترس بودن کربوهیدرات‌ها (بویژه ساکارز) تنظیم می‌شود که برای سنتز نشاسته مورد نیاز است (Li & Kubota, 2009). همچنین (Abdulnour *et al.*, 2003) گزارش کردند که استفاده از نور با شدت ۳۰۰ میکرو مول بر متر مربع در ثانیه سبب افزایش ۲۷ درصدی تعداد مینی‌تیوبرها و ۵۷ درصدی وزن مینی‌تیوبرهای سیب‌زمینی گردید.



شکل ۱- اثرات تیمار طیف‌های مختلف نور تکمیلی بر تعداد مینی تیوبر (A) و وزن مینی تیوبر (B)،

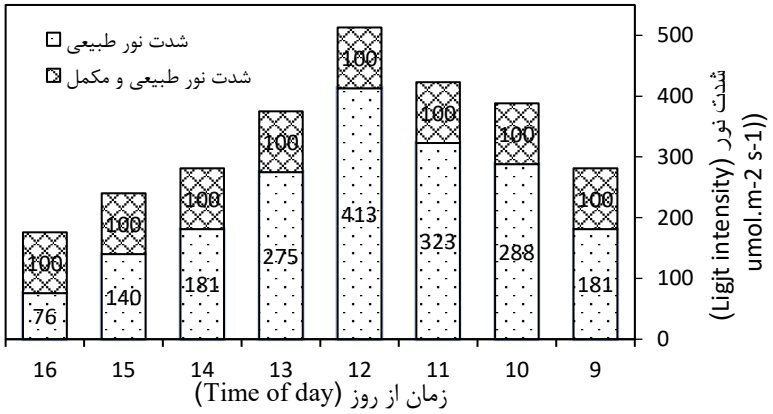
میانگین‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Figure 1- The effects of different spectra of supplementary light on minituber number (A) and minituber weight (B). Means with different letters are significantly different at 5% possibility level

در این تحقیق بیشترین تعداد و وزن مینی‌تیوبر در نور قرمز ۱۰۰ ٪ و نور سفید مشاهده شد و با کاهش شدت نور قرمز و افزایش درصد نور آبی، تعداد و وزن مینی‌تیوبرهای کاهش یافت. Chen و همکاران (۲۰۲۰) و Asadi و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که نور قرمز ۱۰۰٪ سبب افزایش تعداد مینی‌تیوبر در گیاهچه‌های کشت بافتی شد و در نور آبی تعداد مینی‌تیوبرها کاهش یافت. اما به نظر می‌رسد که نور سفید LED با داشتن طیف‌های مختلف نوری (شکل ۱) توانسته به اندازه نور قرمز ۱۰۰٪ سبب افزایش فتوسنتز و تعداد مینی‌تیوبر گردد. Li و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که طیف‌های نوری مختلف با تأثیر بر سنتز و انتقال مواد فتوسنتزی، عملکرد مینی‌تیوبر را تحت تأثیر قرار می‌دهند و تجمع و توزیع ماده خشک را در اندام‌های مصرف‌کننده تغییر می‌دهند. گزارش شده است که نور قرمز، غلظت IAA را در سیب‌زمینی افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش جریان انتقال مواد فتوسنتزی به داخل غده می‌شود (Asghari-Zakaria *et al.*, 2009). علاوه بر این به طور کلی در همه تیمارها عدم استفاده از نور قرمز دور مکمل سبب افزایش تعداد مینی‌تیوبر و وزن مینی‌تیوبر شد (شکل ۱). این امر می‌تواند ناشی از کاهش شدت نور باشد (شدت نور قرمز دور، حدود ۱۰ درصد از شدت نور مکمل را تشکیل داده است) که در نتیجه آن منجز به کاهش غلظت رنگدانه‌های کلروفیل شد و به دنبال آن میزان فتوسنتز کل کاهش یافت (Li & Kubota, 2009).

بین تیمارهای دارای نور قرمز دور، صرفنظر از نسبت طیف‌های نوری، اختلاف معنی‌داری از نظر تعداد و وزن مینی‌تیوبرها مشاهده نشد که نشان می‌دهد در همه تیمارهای دارای نور قرمز دور، وجود ۱۰٪ نور قرمز دور سبب کاهش فتوسنتز و کاهش عملکرد مینی‌تیوبرها گردید. به نظر می‌رسد استفاده از نور قرمز دور با شدت کمتر و استفاده از آن فقط در اواخر روز کارایی بهتری برای فتوسنتز داشته باشد (Kubota *et al.*, 2011).

بر اساس مطالعات انجام شده نور قرمز و آبی فعالیت هدایت روزنه را بیشتر از سایر مناطق طیفی افزایش می‌دهند (Rahman *et al.*, 2021) و در آزمایش حاضر نیز نورهای مکمل در افزایش صفات عملکردی موثر بوده است، بر این اساس به نظر می‌رسد افزایش عملکرد به دلیل سنتز کربوهیدرات‌های بیشتر و در پی آن افزایش نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، باعث ایجاد سیگنال‌های تورم قسمت انتهایی استولون‌ها و تولید بیشتر مینی‌تیوبرها شد.



شکل ۲- شدت نور در ساعات مختلف روز با استفاده از نور طبیعی و نور مکمل

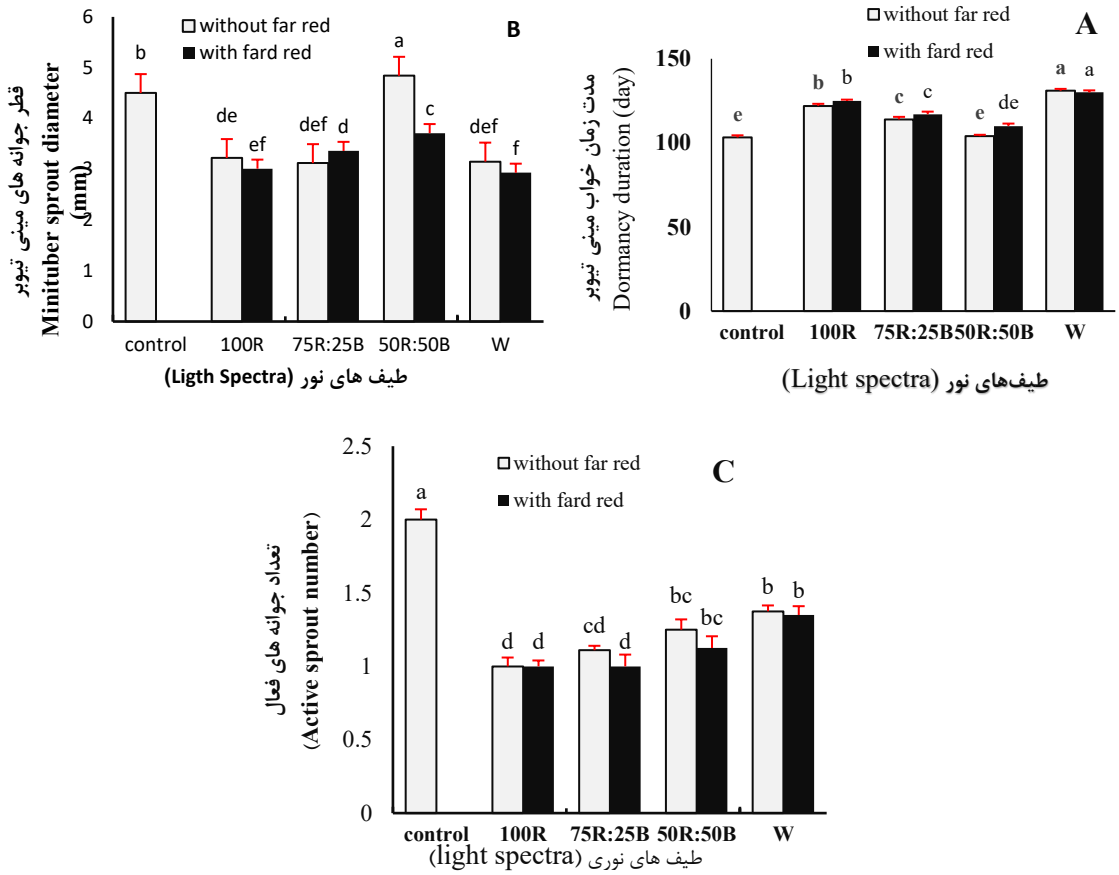
Fig 2- Light intensity during the day with natural light and supplemental light

مدت زمان خواب مینی‌تیوبر، قطر و تعداد جوانه‌های مینی‌تیوبر

بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۳) نشان داد که استفاده از اغلب طیف‌های نوری (لامپ‌های LED) مورد مطالعه در حضور و عدم حضور نور قرمز دور (LED±fr) باعث افزایش مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها نسبت به تیمار شاهد شد. با این وجود تنها در تیمار نوری $50_R:50_B$±fr، مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. به نظر می‌رسد که با افزایش نسبت نور آبی در نور مکمل، مدت زمان خواب جوانه نسبت به کمترین و بیشترین مدت زمان خواب مینی‌تیوبر در تیمارهای کنترل و W-fr به ترتیب به میزان ۱۰۳/۲۵ و ۱۳۱ روز مشاهده شد (شکل ۳-A). حداقل و حداکثر قطر جوانه مینی‌تیوبر در تیمارهای W+fr و $50_R:50_B$ - fr، به ترتیب به میزان ۲/۹۳ و ۴/۸۴ میلی‌متر مشاهده شد (شکل ۳-B). وجود نور قرمز دور در طیف‌های نوری، تأثیر ی بر مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها نداشت.

نتایج نشان داد در تیمارهایی که مدت زمان خواب آن کمتر است قطر جوانه و تعداد جوانه‌های فعال بیشتر است. به عنوان مثال در تیمار نور سفید که مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها بیشترین بود، قطر جوانه فعال و تعداد جوانه کمتری مشاهده شد. به نظر می‌رسد با افزایش نسبت نور قرمز مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها افزایش یافت و در تیمارهای دارای نور آبی مدت زمان خواب مینی‌تیوبرها کاهش یافت. از جمله عواملی موثر بر دوره خواب غده شرایط محیطی (مانند نور) است که گیاه مادری در آن رشد نموده است (Chen *et al.*, 2020). طول دوره خواب در غده‌ها به غلظت اسید آبسزیک، زآتین و اسید جیرلیک (GA_1) در جوانه‌های غده سیب زمینی بستگی دارد که از طریق مسیر موالونیک اسید سنتز می‌شوند (Haider *et al.*, 2022) و نور آبی با تأثیر گذاری بر این مسیر، سبب کاهش غلظت اسید آبسزیک در غده‌ها و کاهش طول دوره خواب مینی‌تیوبرها می‌شود (Chen *et al.*, 2020). گزارش شده تیمارهایی که سبب کاهش طول دوره خواب غده‌های بذری بعد از ۸ هفته انبارداری در دمای ۶ درجه سلسیوس می‌شوند، موجب افزایش عملکرد مینی‌تیوبر در گلخانه می‌گردد (Coleman & Coleman, 2000).

Chen و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که نور آبی سبب کاهش طول دوره خواب در مینی‌تیوبرهای سیب‌زمینی شد. آنها بیان داشتند که طیف‌های مختلف نوری با تأثیر گذاری بر فعالیت آنزیم‌ها، سنتز و انتقال مواد فتوسنتزی می‌توانند رشد غده و خواب آن را تحت تأثیر قرار دهند.



شکل ۳- اثرات تیمار طیف‌های مختلف نور تکمیلی بر مدت زمان خواب مینی‌تیوبر (A) **قطر جوانه‌های مینی‌تیوبر** (B) **و تعداد جوانه‌های فعال هر مینی‌تیوبر** (C). میانگین‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Figure 3- The effects of different spectra of supplementary light on dormancy duration (A), sprout diameter (B), and active sprout number (C). Means with different letters are significantly different at 5% possibility level.

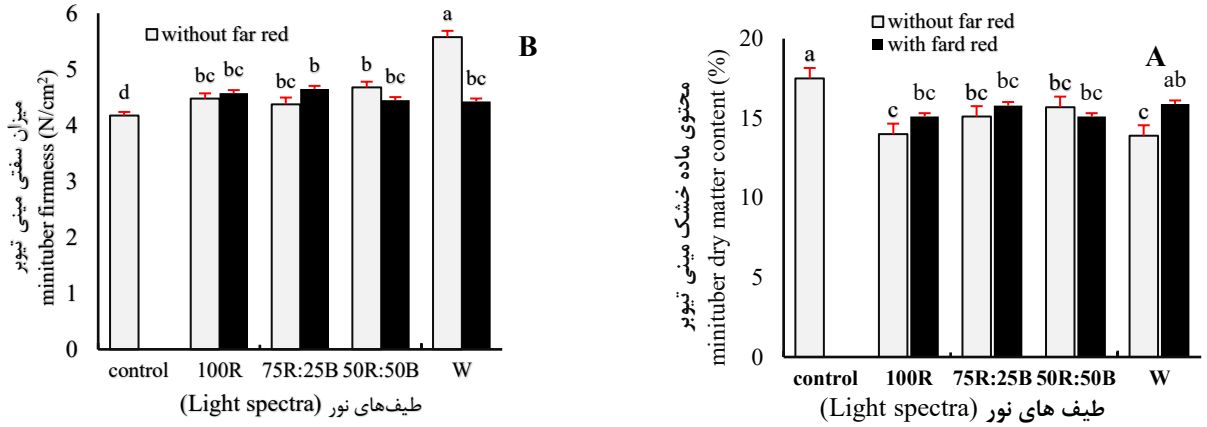
محتوای وزن خشک و سفتی مینی‌تیوبرها

بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۴) نشان داد که حداقل و حداکثر محتوی ماده خشک مینی‌تیوبرها در تیمارهای شاهد و $75_{R}:25_{B}$ - fr، به ترتیب به میزان ۱۷/۵ و ۱۳/۹ درصد بود (شکل ۴-A). سایر تیمارها به جز تیمار نور سفید به همراه نور قرمز دور نیز اختلاف معنی‌داری با شاهد داشت.

میزان سفتی مینی‌تیوبرها تحت تأثیر تیمارهای مختلف نور مکمل قرار گرفت به نحوی که کمترین میزان سفتی مینی‌تیوبر در تیمار شاهد (۴/۱۷) و بیشترین آن در تیمار نور سفید (۵/۵۷ نیوتن بر سانتیمتر مربع) مشاهده شد. میزان سفتی غده در کلیه تیمارهای نوری بیشتر از شاهد بود. نشاسته به عنوان ماده ذخیره‌ای اصلی سیب‌زمینی و ماده خشک بر مقاومت به آفات و بیماری‌ها، انبارمانی، درصد جوانه‌زنی و قدرت رشد مینی‌تیوبر موثر است. به نظر می‌رسد میزان محتوای ماده خشک در مینی‌تیوبرها به عملکرد مینی‌تیوبر هر تیمار بستگی دارد. در تیمار کنترل که کمترین عملکرد مینی‌تیوبر را دارا بود، میزان ماده خشک در سطح بالاتری قرار گرفته و در تیمار ۱۰۰ درصد نور قرمز (100_{R}-fr) که بیشترین عملکرد غده را دارا بود، کمترین میزان ماده خشک مشاهده شد. اگرچه استفاده از نور مکمل سبب افزایش تولید مواد فتوسنتزی (نشاسته و کربوهیدرات‌های محلول) می‌شود (Chen *et al.*, 2020) ولی با افزایش تعداد و وزن مینی‌تیوبر در تیمارهای دارای نور مکمل، مقدار ماده خشک کمتری به هر مینی‌تیوبر تخصیص یافته و درصد ماده خشک آن کاهش یافت.

میزان سفتی غده که نقش مهمی در انبارمانی غده‌های سیب‌زمینی دارد تحت تأثیر ضخامت پوست،

مقدار ماده خشک موجود در غده و درصد رطوبت غده می‌باشد (Gamea *et al.*, 2009). افزایش سفتی غده‌ها در تیمارهای دارای نور مکمل می‌تواند به دلیل افزایش تجمع مقدار نشاسته و ماده خشک باشد ولی با توجه به اینکه در این تحقیق ضخامت پوست مینی‌تیوبرها اندازه‌گیری نشد بنابراین نمی‌توان دلیل اصلی افزایش سفتی بافت مینی‌تیوبرها در تیمارهای دارای نور مکمل را بیان کرد و لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.



شکل ۴- اثرات تیمار طیف‌های مختلف نور تکمیلی بر محتوی وزن خشک (A) و سفتی مینی‌تیوبر (B)
میانگین‌های با حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری هستند.

Figure 2- The effects of different spectra of supplementary light on minituber dry matter content (A) and minituber firmness (B). Means with different letters are significantly different at 5% significance level

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد که اعمال کلیه طیف‌های نوری مکمل منجر به افزایش تعداد و وزن مینی‌تیوبرهای برداشت شده به ازای هر بوته گردید. علاوه بر این در هر طیف نوری، وجود نور قرمز دور سبب کاهش عملکرد شد. بیشترین افزایش عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نور قرمز و تیمار نور سفید بدون قرمز دور مشاهده شد. استفاده از نور تکمیلی سبب افزایش طول دوره خواب مینی‌تیوبرها نسبت به شاهد شد ولی افزایش نسبت نور آبی به قرمز توانست طول دوره خواب غده‌ها را کاهش دهد. میزان سفتی مینی‌تیوبرها در کلیه تیمارهای نوری نسبت به شاهد افزایش یافت. به طور کلی می‌توان از این پژوهش نتیجه گرفت که استفاده از نور تکمیلی به خصوص نور سفید یا نور ۱۰۰ درصد قرمز می‌تواند نتایج مفیدی را از نظر عملکرد و تعداد ریز غده و نیز کیفیت مینی‌تیوبر به همراه داشته باشد اما چون طول دوره خواب طولانی‌تری دارد، لازم است قبل از کشت، این خواب برطرف شود.

References

Abdulnour, J., Roy, G. & Desjardins, Y. (2003). Effect of supplemental lighting, substrate (potting mix) volume and plant densities on potato minituber production during winter greenhouse culture in Quebec. *Acta Hortic*, 619, 53-58. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.619.6

Asadi, A., Kafi, M., Nabati, J., & Goldani, M. (2018). Effect of different light sources in in vitro on growth, morphology and minituber production of potato (*Solanum tuberosum* L.) in hydroponic conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 48(4), 933-941. https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.217759.1103

Asghari-Zakaria, R., Maleki-Zanjani, B. & Sedghi, E. (2009). Effect of in vitro chitosan application on growth and minituber yield of *Solanum tuberosum*

L. *Plant Soil Environ*, 55(6), 252–256. https://doi.org: 10.17221/1018-PSE

Brocic, Z., Oljaca, J., Pantelic, D., Rudic, J. & Momcilovic, I., (2022). Potato aeroponics: Effects of cultivar and plant origin on minituber production. *Horticulturae.* 8(10), 915-923. https://doi.org/10.3390/horticulturae8100915

Chen, L., Zhang, K., Gong, X., Wang, H., Gao, Y., Wang, X., Zeng, Z. & Hu, Y. (2020). Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse. *Journal of Integrative Agriculture.* 19(1), 108–119. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X

Cizek, M. and Komarkova, Z. (2022*).* Comparison of aeroponics technology with a conventional system of production of potato minitubers in the conditions of the Czech Republic. *Plant, Soil and Environment,* 68 (8), 366–374. https://doi.org/10.17221/164/2022-PSE

Coleman, W.K. and Coleman, S.E. (2000). Modification of potato microtuber dormancy during induction and growth in vitro or ex vitro. *American Journal of. Potato Research*, 77, 103–110. https://doi.org/10.1007/BF02853737

Food and Agriculture Organization. (2023). Crops and livestock products. Retrieved July 1, 2025, from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

Fouad, H.M., Genesia, F.O., Khalid, E., Abd, E.H. & Basma, A.E. (2018). Influence of plant Density and genotype on potato Minituber production from microshoots and microtubers. *Catrina,* 17(1),77-84. https://doi.org/10.21608/cat.2018.14317

Gamea, G.R., Abd El-makaud, M.A & Abd El-Gawad, A.M. (2009). Physical characteristics and chemical properties of potato tubers under different storage systems. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 26(1), 385-408. https://doi.org/10.21608/mjae.2020.110155

Haider, M.W., Nafees, M., Ahmad, I., Ali, B., Maryam, I.R., Vodnar, D.C., Marc, R.A., Kamran, M., Saleem, M.H., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hemaid, F.M. & Elshikh, MS. (2022). Postharvest dormancy-related changes of endogenous hormones in relation to different dormancy-breaking methods of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Front. Plant Sci*., 13, 945256. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.945256

Hasanpanah, D., Kazemi, M., Musapour, A. & Jalali, A.H. (2018). *A comprehensive guide to modern potato farming*. Agricultural Research and Education Organization.

Islam, M.J., Ryu, B.R., Azad, M.O.K., Rahman, M.H., Rana, M.S., Kang, C.-W.; Lim, J.-D., Lim, Y.S. (2021). Comparative growth, photosynthetic pigments, and osmolytes analysis of Hemp (*Cannabis sativa* L.) seedlings under an aeroponics system with different led light sources. *Horticulturae*, 7, 239-249. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080239

Kubota, C., Chia, P., Yang, Z. & Li, Q. (2011). Applications of far-red light emitting diodes in plant production under controlled environments. *Acta Hortic*. 952, 59-66. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.4

Li, R., Long, J., Yan, Y., Luo, J., Xu, Z., and Liu, X. (2020). Addition of White Light to Monochromatic Red and Blue Lights Alters the Formation, Growth, and Dormancy of *In Vitro*-grown *Solanum tuberosum* L. Microtubers. *HortScience*, 55(1), 71-77. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14548-19

Li, Q. and Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce, *Environmental and Experimental Botany*, 67(1): 59-64. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011

Li, R., You J., Miao, C., Kong, L., Long, J., Yan, Y., & Liu, X. (2020). Monochromatic lights regulate the formation, growth, and dormancy of in vitro-grown *Solanum tuberosum* L. microtubers. *Scientia Horticulturae*, 261,108947. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108947

Liu, X.Y., Jiao, X.L., Chang, T.T., Guo, S.R. & Xu, Z.G. (2018). Photosynthesis and leaf development of cherry tomato seedlings under different LED-based blue and red photon flux ratios. *Photosynthetica*, 56, 1212–1217. https://doi.org/10.1007/s11099-018-0814-8

Rahman, H., Islam, J., Kalam Azad, O., Rana, S., Ryeol Ryu, B. & Lim, Y. (2021). LED light pre-treatment improves pre-basic seed potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Golden King) production in the aeroponic system. *Agronomy*, 11(8), 1627-1635. https://doi.org/10.3390/agronomy11081627

Rahman, M.H., Azad, M.O.K., Islam, M.J., Rana, M.S., Li, K.-h., & Lim, Y.S. (2021). Production of potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber under artificial LED light irradiation in plant factory. *Plants*, 10, 297-312. https://doi.org/10.3390/plants10020297

Tessema, L., Chindi, A., Giorgis, G.W., Solomon, A., Egata Shunka, A. & Seid, E. (2017). Determination of nutrient solutions for potato *(Solanum tuberosum* L.) seed production under aeroponics production system. *Open Agriculture*, 2, 155–159. http://dx.doi.org/10.1515/opag-2017-0015

Vahid Taze-Kand, Sh & Shahryari, R. (2023). Humic priming of Agria potato seedlings for production of seed minitubers. *Journal of Vegetables Sciences*. 16(8): 167-182. (In Persian). https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.1999972.1279

Zha, L. and Liu, W. (2018). Effects of red/blue light ratio with different light intensity on growth and yield of cherry radish. *Chinese Journal of Agrometeorology*. 39(3), 162-167. https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2018.03.003

Zheng, L., He, H. & Song, W. (2019). Application of light-emitting diodes and the effect of light quality on horticultural crops. *Hortscience*, 54(10), 1656–1661. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14109-19

Zhou, B., Li, Y., Zhang, C., Cao, L., Chengsong Li, Ch., Xie, Sh. & Niu, Q. (2022). Potato planter and planting technology: a review of recent developments. *Agriculture*, 10(12), 1600-1612. https://doi.org/10.3390/agriculture12101600

هیات تحریریه نشریه علوم سبزی‌ها با ارج نهادن به خدمات علمی ارزشمند زنده یاد دکتر ساسان علی‌نیائی‌فرد، عضو فقید هیأت علمی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، یاد و خاطره این استاد گران‌قدر را گرامی می‌دارد.

روحش شاد و یادش گرامی