



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال دوازدهم/ شماره چهارم/ ۱۴۰۴ (۲۶-۱۵)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2026.9712



ارزیابی اثر شرایط محیطی بر جوانه‌زنی و خواص آنتی‌اکسیدانی جوانه خوراکی بذرهای ماش (*Vigna radiata*)، گندم (*Triticum aestivum*) و شبدر (*Trifolium alexandrinum* L.) در سیستم هیدروپونیک

سیدآرین مقدس تفرشی^۱، سحر دعائی^{۲*}، هادی رهاننده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۹

چکیده

دمای محیط و ویژگی‌های نور، به‌ویژه طول دوره رو‌شنایی و نوع طیف تابشی، از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در جوانه‌زنی بذرها و تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مراحل آغازین رشد محسوب می‌شوند. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر می‌شود که جوانه‌های خوراکی به دلیل دارا بودن ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو، جایگاه ویژه‌ای در تغذیه و سلامت غذایی پیدا کرده‌اند. این پژوهش به‌منظور بررسی اثر سه سطح دمایی ۲۳، ۲۸ و ۳۱ درجه سانتی‌گراد، دو فتوپریود ۱۲ و ۱۶ ساعت و دو نوع نور LED شامل سفید و قرمز-آبی بر شاخص‌های جوانه‌زنی و ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی جوانه‌های خوراکی ماش، گندم و شبدر در شرایط هیدروپونیک انجام شد. بذرها در سیستم هیدروپونیک حاوی آب مقطر و محلول غذایی هوارسانی شده هُوگ‌لند، بر روی سینی‌های توری با تهویه و در شرایط کنترل‌شده‌ی دما و نور رشد داده شدند. آزمایش در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید و علاوه بر درصد جوانه‌زنی، مقادیر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد دما و نور اثر معنی‌داری بر پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی جوانه‌ها دارند. دمای ۲۸ درجه بیشترین جوانه‌زنی را در هر سه گونه ایجاد کرد، در حالی‌که گندم در دمای ۳۱ درجه پایداری بیشتری نسبت به ماش و شبدر نشان داد. شبدر نیز در دمای ۲۳ درجه با تأخیر جوانه‌زنی مواجه شد. نور قرمز-آبی و فتوپریود ۱۶ ساعته، موجب افزایش شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی شدند. همچنین ماش بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، گندم بیشترین فلاونوئید و شبدر بیشترین فنل کل را نشان داد. نتایج بیانگر اهمیت تنظیم هماهنگ دما، نور و فتوپریود در بهبود کارایی جوانه‌زنی و افزایش ارزش تغذیه‌ای جوانه‌ها هستند.

واژه‌های کلیدی: جوانه‌زنی، دما، سیستم هیدروپونیک، فتوپریود، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل کل

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

aryanmoghaddastafreshy@gmail.com

s.doaei@liau.ac.ir

rahanandeh@iau.ac.ir

۲- استادیار، گروه کشاورزی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

۳- استادیار، گروه گیاه‌پزشکی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.

*نویسنده مسئول: s.doaei@liau.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای به تولید مواد غذایی غنی از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و تأثیر آن‌ها بر سلامت انسان جلب شده است. ترکیباتی مانند فنل‌ها، فلاونوئیدها و آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) با خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، نقش مهمی در پیشگیری از بیماری‌های مزمن از قبیل سرطان، دیابت و بیماری‌های قلبی ایفا می‌کنند (Sies, 2015). جوانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع طبیعی و قابل‌دسترس این ترکیبات، در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در صنایع غذایی و سلامت یافته‌اند. در جریان جوانه‌زنی، متابولیسم ثانویه گیاه فعال تر شده و میزان تولید ترکیبات زیست‌فعال به‌ویژه آنتی‌اکسیدان‌ها به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد (Mao et al., 2017; Shahrajabian et al., 2019).

جوانه‌زنی دانه‌ها علاوه بر افزایش ارزش تغذیه‌ای، موجب بهبود قابلیت هضم، کاهش ترکیبات ضدتغذیه‌ای و افزایش جذب عناصر معدنی می‌شود. در میان بذرهای جوانه‌زن، دانه‌های ماش (*Vigna radiata* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.) و شبدر (*Trifolium alexandrinum/pratense* L.) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، زیرا سرشار از پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی هستند (Kaushik et al., 2017; Pasqualone et al., 2020).

در روش‌های نوین تولید، استفاده از سامانه‌های کشت هیدروپونیک به‌عنوان جایگزینی مؤثر برای کشت خاکی رواج یافته است. این سیستم امکان کنترل دقیق پارامترهای محیطی شامل دما، شدت نور، طیف نوری، pH، هدایت الکتریکی (EC) و ترکیب محلول غذایی را فراهم می‌کند و به‌دلیل افزایش بهره‌وری آب و بهبود کیفیت محصول، طی سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Kumar et al., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که تغییر در شدت و طیف نور، به‌ویژه نورهای LED قابل‌کنترل، می‌تواند سنتز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی و همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در جوانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Wang et al., 2023).

از دید فیزیولوژیکی، جوانه‌زنی فرآیندی پیچیده و وابسته به محیط است. دما یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فعال‌سازی مسیرهای متابولیک اولیه شامل

هیدرولیز ذخایر غذایی، افزایش فشار تورژسانس و آغاز رشد ریشه‌چه محسوب می‌شود. معمولاً دمای بهینه‌ی جوانه‌زنی بسیاری از گیاهان زراعی در محدوده‌ی ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس گزارش شده است؛ در حالی که دمای پایین موجب تأخیر در جوانه‌زنی و دمای بالا سبب بروز تنش حرارتی و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌گردد (Zhang et al., 2024). از سوی دیگر، نور و فتوپریود از طریق گیرنده‌هایی مانند فیتوکروم‌ها و کریپتوکروم‌ها مسیرهای سیگنال‌دهی هورمونی و بیوسنتز آنتی‌اکسیدان‌ها را تنظیم می‌کنند. افزایش طول دوره روشنایی معمولاً سبب بهبود فتوسنتز اولیه و رشد گیاهچه می‌شود و می‌تواند سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را افزایش دهد (Narsai and Whelan, 2020).

گونه‌های زراعی ماش، گندم و شبدر هر سه نسبت به تغییرات دما و نور حساسیت قابل‌توجهی نشان می‌دهند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که افزایش دما تا حدود ۳۰ درجه موجب افزایش جوانه‌زنی ماش و شبدر شده و در گندم نیز تحت این شرایط مقادیر بالاتری از ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی مشاهده می‌شود (Kaushik et al., 2017; Islam et al., 2017). شبدر نیز به‌عنوان گیاهی علوفه‌ای و دارویی، به‌طور طبیعی حاوی ایزوفلاون‌ها و ترکیبات فنلی با فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاست (Kafayatullah et al., 2020).

آغاز فرآیند جوانه‌زنی وابسته به فعال‌سازی مسیرهای زیستی اولیه است که به‌طور مستقیم از شرایط محیطی تأثیر می‌پذیرند. دما فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ذخایر بذر (مانند آمیلاز و پروتئاز) را تنظیم کرده و بر سرعت جذب آب و طول دوره لاگ جوانه‌زنی اثرگذار است. نور نیز از طریق گیرنده‌های نوری، مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه را در مراحل اولیه فعال می‌نماید (Siriparu et al., 2022). دوره لاگ جوانه‌زنی (Germination Lag Phase) به‌عنوان مدت زمانی تعریف می‌شود که بذر پس از شروع جذب آب نیاز دارد تا اولین نشانه‌های حیات فعال، نظیر خروج ریشه‌چه (Radicle Emergence)، از پوشش بذر نمایان شود. این پارامتر نشان‌دهنده کارایی اولیه متابولیسم بذر تحت شرایط محیطی مختلف است.

با وجود مطالعات متعدد پیرامون اثر دما یا نور به صورت جداگانه، در ایران پژوهش‌های اندکی به بررسی تأثیر هم‌زمان دما و نوع نور بر شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی و فیزیولوژی یک جوانه‌ها در سیستم‌های هیدروپونیک پرداخته‌اند.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر هم‌زمان دما، نوع نور و فتوپریود بر فرآیند جوانه‌زنی و تغییرات آنتی‌اکسیدانی جوانه‌های ماش، گندم و شبدر طراحی و اجرا شد تا درک جامع‌تری از تعامل این پارامترها در شرایط کنترل‌شده ارائه دهد. انتخاب سطح دماهای ۲۳، ۲۸ و ۳۱ درجه سلسیوس و منابع نوری مختلف در این مطالعه، امکان بررسی هم‌زمان پاسخ جوانه‌زنی و تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم و فناوری بذر دانشگاه آزاد گیلان، رشت- ایران برگزار شد. آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید.

فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از؛

دما در سه سطح (۲۳، ۲۸ و ۳۱ درجه سلسیوس)، منبع نور در دو سطح (نور سفید کامل و نور LED قرمز-آبی) و گونه گیاهی در سه سطح (جوانه ماش، گندم و شبدر).

آماده سازی و جوانه‌زنی بذر

برای بررسی اثر دما و دوره نوری بر جوانه‌زنی، بذره‌های ماش (*Vigna radiata* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.) و شبدر (*Trifolium alexandrinum* L.) ایرانی از منابع معتبر تهیه و پس از جداسازی بر اساس یکنواختی ظاهری، به مدت ۵ دقیقه در محلول ۱٪ هیپوکلریت سدیم ضدعفونی و سپس با آب مقطر شسته شدند. بذرها به منظور یکنواخت‌سازی شروع جوانه‌زنی، به مدت ۲ ساعت خیسانده و به پتری‌دیش‌های حاوی کاغذ صافی مرطوب (۲۵ بذر در هر واحد آزمایشی) که با محلول غذایی استاندارد هوگلند (pH ۶/۵-۶) مرطوب شده بود، منتقل شدند. این محلول هر دو روز یک‌بار تعویض شد تا شرایط تغذیه‌ای پایدار حفظ گردد.

در این پژوهش از محلول غذایی استاندارد هوگلند (Hoagland and Arnon, 1950) استفاده شد که تمامی

عناصر ماکرو و میکرو ضروری را در نسبت‌های متعادل برای رشد گیاه در سیستم هیدروپونیک تأمین می‌کند. به دلیل ترکیب پایدار و قابلیت تکرارپذیری بالا، این محلول یکی از پرکاربردترین فرمول‌های تغذیه معدنی در مطالعات فیزیولوژی گیاهی است. pH محلول در بازه ۶ تا ۶/۵ تنظیم شد و محلول غذایی به صورت منظم، هر دو روز یک‌بار تعویض گردید.

تیمارهای آزمایشی شامل سه دمای ۲۳، ۲۸ و ۳۱ درجه سلسیوس و دو فتوپریود ۱۲ و ۱۶ ساعت روشنایی بودند که در ژرمیناتورهای مجهز به کنترل دقیق دما و زمان‌بندی روشنایی اعمال شدند. منبع نور در تمامی تیمارها یکسان بود و تنها طول دوره روشنایی تغییر می‌کرد؛ همچنین شدت نور در سطح بذرها ثابت نگه داشته شد و رطوبت نسبی محیط در محدوده ۶۵ تا ۷۰ درصد تنظیم گردید.

آزمایش به صورت فاکتوریل (۳ دما × ۲ فتوپریود) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. روند جوانه‌زنی طی ۷ روز پایش شد و بذرهایی که ریشه‌چه‌ای به طول حداقل ۲ میلی‌متر تولید کرده بودند، جوانه‌زده محسوب شدند.

درصد جوانه زنی نهایی

$$GP(\%) = 100 \times (gN / tN) \quad (GP):$$

که در آن: gN = تعداد بذره‌های جوانه زده، tN = کل بذره‌های کشت شده و در صورت نیاز شاخص میانگین زمان جوانه زنی (MGT) نیز محاسبه شد:

$$MGT = \sum(n_i \times t) / \sum n$$

- n_i تعداد بذرهایی که در هر بازه زمانی مشخص (t) جوانه‌زده‌اند.

- $\sum n$: مجموع تعداد بذره‌های جوانه‌زده در طول دوره پایش معادل Ng می‌باشد.

معیار کیفی درصد جوانه زنی به این صورت تعیین و تفسیر شد. ۱- Very High (خیلی بالا): این بالاترین سطح عملکرد را نشان می‌دهد، یعنی درصد جوانه‌زنی نهایی بسیار نزدیک به صد درصد است (>۹۰٪). ۲- High (بالا): عملکرد بسیار خوب: درصد جوانه‌زنی بالا (مثلاً ۷۵٪ تا ۸۵٪). ۳- Moderat. (متوسط) عملکرد قابل قبول، درصد جوانه‌زنی متوسط (مثلاً ۶۵٪ تا ۷۵٪). Low-Moderate، Sharp Decrease, Considerable Decrease

نشان‌دهنده تأثیر منفی تنش محیطی (غالباً دمای بالا یا نور کم) هستند.

داده‌ها پس از آزمون نرمالیتی تحت تجزیه واریانس (ANOVA) قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح $P < 0.05$ انجام شد.

تیمارهای نوری و شرایط محیطی

در این پژوهش از دو منبع نوری LED فول‌اسپکتر (Full Spectrum) یا سفید کامل با شدت تابشی ۱۲۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه و LED قرمز-آبی با نسبت طیفی قرمز به آبی ۳:۱ و شدت ۱۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه ساخت شرکت ایران سان لایت استفاده شد. نوردهی در دو دوره روشنایی ۱۲ و ۱۶ ساعت در شبانه‌روز اعمال شد. فاصله لامپ‌ها از سطح بستر ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بین سینی‌ها ۲۰ سانتی‌متر تنظیم گردید.

اندازه‌گیری شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی

جوانه‌زنی و دوره بلافاصله پس از آن، مرحله‌ای است که گیاهچه (ساقه نوپا) از ذخایر بذر جدا شده و برای استقرار سیستم ریشه‌ای و برگ‌های فتوسنتزی اولیه وارد فاز رشد مستقل می‌شود. در این مرحله بسیار حساس، گیاه به شدت در برابر تنش‌های محیطی (مانند دمای اعمال شده) آسیب‌پذیر است. بررسی پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی در روز پنجم به ما این امکان را می‌دهد که پاسخ‌های دفاعی اولیه گیاه را قبل از تثبیت کامل مکانیسم‌های مقاومتی بلندمدت، اندازه‌گیری کنیم. در مطالعات مربوط به تنش‌های محیطی بر روی گیاهچه‌های جوان، اغلب مشاهده می‌شود که سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی در بازه زمانی ۳ تا ۷ روز پس از اعمال شرایط آزمایشی، به اوج فعالیت خود می‌رسند تا با استرس مقابله کنند. نمونه‌برداری در روز پنجم، بهترین نقطه تعادل بین شروع پاسخ استرس و آسیب برگشت‌ناپذیر به گیاهچه است و به خوبی بازه اوج فعالیت و تنظیم مجدد مکانیسم‌های دفاعی را پوشش می‌دهد. به همین دلیل پنج روز پس از شروع جوانه‌زنی، نمونه‌ها برداشت شدند و شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی مطابق زیر سنجش گردید.

۱. ظرفیت مهار رادیکال آزاد (DPPH): با استفاده از معرف پایدار DPPH و قرائت کاهش جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر اندازه‌گیری شد (Brand-Williams et al., 1995).

۲. فنل کل (TPC): با استفاده از معرف فولین-سیوکالتو (Folin-Ciocalteu) و خوانش جذب در طول موج ۷۶۵ نانومتر تعیین شد و نتایج بر اساس منحنی کالیبراسیون اسید گالیک، بر حسب میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم وزن خشک بیان گردید.

۳. محتوای فلاونوئید کل (TFC): با تشکیل کمپلکس با آلومینیوم کلرید و اندازه‌گیری جذب در ۵۱۰ نانومتر محاسبه شد و نتایج بر حسب میلی‌گرم کاتکین بر گرم وزن خشک گزارش شد (Zhishen et al., 1999).

۴. فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT): اندازه‌گیری کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر که مربوط به تجزیه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) توسط CAT است، طبق روش (Aebi, 1984) تعیین شد.

۵. فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD): با استفاده از گایاکول به عنوان سوبسترا اندازه‌گیری شد. افزایش جذب ناشی از تشکیل محصول اکسیداسیون در طول موج ۴۷۰ نانومتر ثبت گردید (Maehly and Chance, 1995). تمام اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام شد و داده‌ها به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی با نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۴ مورد تجزیه واریانس قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم نمودارها با نرم‌افزار Microsoft Excel ۲۰۱۶ انجام گرفت. پیش‌فرض‌های آماری شامل نرمال بودن داده‌ها و یکنواختی واریانس نیز پیش از تحلیل بررسی شدند.

نتایج و بحث

تأثیر دما بر جوانه‌زنی بذر

نتایج نشان داد که دما و فتوپریود هر دو اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی بذرهای ماش، گندم و شبدر در سطح ۵ درصد داشتند. براساس داده‌های جدول ۱، دمای ۲۸ درجه سلسیوس بالاترین درصد جوانه‌زنی را در هر سه گونه ایجاد کرد و به عنوان دمای بهینه عمل نمود. این الگو با یافته‌های دیگر محققین که محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس را بهترین بازه حرارتی برای فعال‌سازی مسیرهای متابولیکی اولیه بذر سبزیجات و محصولات

زراعی معرفی کرده‌اند، هم خوانی داشت (Bradford, 2016; Bewley et al., 2018). در تحقیق دیگری نشان داده شد فعالیت آمیلاز و سرعت رشد ریشه‌چه در گندم در همین محدوده به بیشترین مقدار می‌رسد (Kaushik et al., 2017)، که نتایج حاضر را تأیید می‌کند.

در دمای ۲۳ درجه سلسیوس کاهش معنی‌دار در صد جوانه‌زنی و تأخیر در ظهور ریشه‌چه مشاهده شد. این کاهش احتمالاً به دلیل محدود شدن فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک، به‌ویژه آمیلاز در دمای زیر ۲۵ درجه سلسیوس و کند شدن مرحله جذب آب اولیه (Imbibition) است. یافته‌های مشابه گزارش شده است که دمای زیر ۲۵ درجه را عامل کندی فعالیت آنزیمی و کاهش انرژی موردنیاز برای آغاز رشد می‌دانند (Shahrajabian et al., 2019; Mao et al., 2017).

در مقابل، دمای ۳۱ درجه سلسیوس باعث افت محسوس جوانه‌زنی شد و شدت این کاهش در ماش و شبدر بیشتر بود. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که دماهای بالاتر از ۳۰ درجه با افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) موجب اختلال در فعالیت آنزیم‌های

تنفسی، کاهش ATP و در نتیجه کاهش توان آغاز جوانه‌زنی می‌شوند (Zhang et al., 2021). حساسیت بالاتر ماش و شبدر به دماهای بالا نیز با نتایج اسلام و همکاران (2017) هم‌راستا است که نشان داد ماش در دماهای بالاتر از محدوده بهینه به‌سرعت دچار تنش گرمایی می‌شود (Islam et al., 2017).

تأثیر فتوپریود بر جوانه‌زنی بذر

فتوپریود نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیند جوانه‌زنی داشت و افزایش مدت روشنایی از ۱۲ به ۱۶ ساعت موجب ارتقای معنی‌دار شاخص‌های جوانه‌زنی در هر سه گونه گردید، به‌ویژه آن که شبدر بالاترین میزان حساسیت مثبت به افزایش نور را نشان داد (جدول ۱). این الگو با گزارش‌های پیشین هم‌راستا است که بیان می‌کنند افزایش مدت تابش نور از طریق فعال‌سازی فیتوکروم‌ها و تقویت مسیرهای هورمونی مرتبط با شکستن رکود و آغاز جوانه‌زنی، باعث تحریک عملکرد بذر می‌شود (Samuolienė et al., 2011).

جدول ۱- درصد متوسط جوانه‌زنی بذرهای ماش، گندم و شبدر در سه دمای مختلف و دو فتوپریود

Table 1. Average germination percentage of mung bean, wheat, and clover seeds under three temperature levels and two photoperiods

گونه Species	فتوپریود ۱۶ ساعت Photoperiod 16 h	فتوپریود ۱۲ ساعت Photoperiod 12 h	دما (°C) Temperature (°C)
ماش Mung bean	متوسط Moderate	Low-moderate (slow increase) کم-متوسط (افزایش کند)	23
ماش Mung bean	بسیار بالا Very high	High بالا	28
ماش Mung bean	کاهش شدید Sharp decrease	کاهش قابل توجه Considerable decrease	31
گندم Wheat	متوسط رو به بالا Moderate-to-high	متوسط Moderate	23
گندم Wheat	بسیار بالا Very high	High بالا	28
گندم Wheat	پایین Low	متوسط رو به پایین Moderate-to-low	31
شبدر Clover	متوسط Moderate	پایین Low	23
شبدر Clover	بسیار بالا Very high	High بالا	28
شبدر Clover	کاهش شدید Sharp decrease	کاهش شدید Sharp decrease	31

فعال‌سازی مسیرهای متابولیکی اولیه بذر، تنظیم نسبت هورمون‌های کلیدی و جلوگیری از بروز تنش‌های حرارتی یا سرمایی در مراحل آغازین رشد به شمار می‌آیند (Samuolienė et al., 2011). تفاوت‌های مشاهده‌شده در شدت و شکل پاسخ جوانه‌ها نیز بازتابی از تفاوت‌های ژنتیکی، ساختاری و متابولیکی میان گونه‌هاست که در

در جمع‌بندی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب دمای ۲۸ درجه سلسیوس همراه با فتوپریود طولانی‌تر (۱۶ ساعت) محیطی بهینه برای تکمیل فرآیند جوانه‌زنی هر سه گونه فراهم می‌کند (Narsai and Whelan, 2020). تطابق این نتایج با مطالعات قبلی تأییدی بر این است که دما و نور، دو محرک اساسی در

تحقیقات پیشین نیز مطرح شده است (Narsai and Whelan, 2020; Samuolienė et al., 2011)

ظرفیت مهار رادیکال آزاد (DPPH)

نتایج نشان داد که دما و نوع منبع نوری اثر معنی‌داری بر ظرفیت مهار رادیکال آزاد (DPPH) در جوانه‌های ماش، گندم و شبدر دارند ($P < 0.01$). بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در دمای ۲۸ درجه سلسیوس و تحت نور LED قرمز-آبی مشاهده شد، در حالی که کمترین میزان مهار DPPH در دمای ۲۳ درجه سلسیوس و تیمار نور سفید ثبت گردید. در میان گونه‌های مورد بررسی، گندم پاسخ پایدارتر و یکنواخت‌تری نسبت به تغییرات نور و دما نشان داد، در حالی که ماش بیشترین تغییر پذیری را داشت. افزایش معنی‌دار ظرفیت مهار رادیکال آزاد (DPPH) در دمای ۲۸ درجه سلسیوس بیانگر بهینه‌بودن فعالیت متابولیت‌های ثانویه در این محدوده دمایی است (جدول ۲)، زیرا در این دما فعالیت آنزیم‌های کلیدی مسیر

فنیل‌پروپانویید مانند فنیل‌آلانین آمونیالایز (PAL) و پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) افزایش یافته و تولید ترکیبات آروماتیک و فنلی با قدرت احیاکنندگی بالا را تقویت می‌کند (Kaushik et al., 2017). در مقابل، دمای ۳۱ درجه سلسیوس به دلیل ایجاد گرمای اضافی، موجب اختلال در پایداری ساختار آنزیم‌ها، افزایش گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و در نهایت اکسیداسیون ترکیبات آنتی‌اکسیدانی می‌شود؛ الگویی که با گزارش‌های پیشین درباره جوانه ماش نیز همخوانی دارد (Islam et al., 2017). از نظر بین‌گونه‌ای، جوانه شبدر بالاترین DPPH را نشان داد؛ موضوعی که احتمالاً با وجود ایزوفلاون‌هایی مانند ژنیستئین و فورموننتین مرتبط است، ترکیباتی که به‌عنوان scavenger های مؤثر ROS شناخته می‌شوند (Pasqualone et al., 2020). در جمع‌بندی، دمای ۲۸ درجه سلسیوس می‌تواند به‌عنوان دمای بهینه برای ایجاد یک تنش حرارتی ملایم و در نتیجه تحریک مسیرهای دفاعی آنتی‌اکسیداتیو در جوانه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۲- تأثیر دما بر شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی جوانه‌ها در سیستم هیدروپونیک

Table 2. Effect of temperature on antioxidant indices of sprouts in a hydroponic system

گونه Species	دما (°C)	DPPH (μmol TE/g DW)	کل فنل Total Phenolic Content (mg GAE/g DW)	فلاونوئید کل Total Flavonoid Content (mg CE/g DW)
Mung bean ماش	23	1.2 ± 42.6b	0.012 ± 1.92b	b 0.004 ± 0.83b
Mung bean ماش	28	1.6 ± 58.3a	0.010 ± 2.47b	0.005 ± 1.15b
Mung bean ماش	31	1.5 ± 40.4b	0.008 ± 1.38b	0.015 ± 0.75b
Wheat گندم	23	1.4 ± 39.8b	0.006 ± 1.76b	0.008 ± 0.68b
Wheat گندم	28	1.8 ± 52.7a	0.009 ± 2.34a	0.007 ± 1.20b
Wheat گندم	31	1.3 ± 38.1b	0.007 ± 1.70b	0.009 ± 1.17b
Clover شبدر	23	1.6 ± 39.9b	0.010 ± 2.00b	0.007 ± 1.10b
Clover شبدر	28	1.9 ± 56.3a	0.011 ± 2.70a	0.010 ± 2.20b
Clover شبدر	31	1.5 ± 44.8b	0.007 ± 2.03b	0.004 ± 0.90b

میانگین‌هایی با حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌دار ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

محتوای فنل کل

فنل‌ها از ترکیبات اصلی مسیر فنیل‌پروپانویید هستند و نقش مهمی در حفاظت سلول در برابر اکسیداسیون ایفا می‌کنند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که دما، نوع نور و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر مقدار فنل کل جوانه‌ها داشتند ($P > 0.05$).

بیشترین مقدار فنل کل در تیمار نور LED قرمز-آبی و دمای ۲۸ سلسیوس ثبت شد، در حالی که کمترین مقدار در شرایط نور سفید و دمای ۲۳ سلسیوس مشاهده گردید.

از نظر بین‌گونه‌ای، جوانه شبدر بیشترین میزان ترکیبات فنلی را دارا بود و پس از آن ماش و گندم قرار گرفتند. این تفاوت‌ها حاکی از حساسیت بالاتر لگوم‌ها به شرایط نوری و حرارتی و همچنین ظرفیت بیشتر آن‌ها برای سنتز ترکیبات فنلی در مسیر فنیل‌پروپانویید است. افزایش دما از ۲۳ به ۲۸ درجه موجب افزایش ۱۸ تا ۲۵ درصدی محتوای فنل کل شد. با این حال، در دمای ۳۱ سلسیوس کاهش معنی‌داری (حدود ۱۵ درصد) مشاهده گردید که نشان‌دهنده اثر منفی تنش گرمایی بر پایداری فنل‌ها است (جدول ۲).

جدول ۳- اثر نوع نور بر مقدار فنل کل در جوانه‌ها

Table 3. Effect of light type on total phenolic content in sprouts

گونه (Species)	نوع نور (Light type)	فنل کل Total Phenolic Content (mg GAE/g DW)
ماش (Mung bean)	سفید (White)	0.09 ± 2.05b
ماش (Mung bean)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.11 ± 2.56a
گندم (Wheat)	سفید (White)	0.07 ± 1.92b
گندم (Wheat)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.09 ± 2.38a
شبدر (Clover)	سفید (White)	0.08 ± 2.25b
شبدر (Clover)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.12 ± 2.81a

میانگین‌هایی با حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌دار ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

با نور قرمز-آبی اثر هم‌افزایی قابل‌ملاحظه‌ای در تقویت مسیره‌های بیوسنتز ترکیبات فنلی در سیستم‌های هیدروپونیک دارد (جدول ۳) و می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی جوانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Samuolienė et al., 2011; Wang et al., 2023).

محتوای فلاونوئید کل

تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که «نوع نور» و «دمای تیمار» به‌طور معنی‌دار بر میزان فلاونوئید کل در جوانه‌ها تأثیر داشتند ($P < 0.01$). بیشترین مقدار فلاونوئید کل در تیمار ترکیبی نور قرمز-آبی با دمای ۲۸ درجه سلسیوس به‌دست آمد، در حالی که کمترین مقدار در شرایط نور سفید و دمای ۲۳ درجه سلسیوس مشاهده شد. در میان گونه‌های مختلف، جوانه شبدر بیشترین محتوا را داشت (به‌طور میانگین ۱/۲۹ mg CE/g DW) و پس از آن ماش و گندم قرار گرفتند (جدول ۲ و ۴).

قرارگیری گیاهچه‌ها تحت نور قرمز-آبی در مقایسه با نور سفید موجب تحریک قابل‌توجه بیان ژن‌های کلیدی مسیر فنیل‌پروپانوئید، شامل PAL، C4H و CL شد. افزایش بیان این ژن‌ها باعث تقویت سنتز پیش‌سازهای مشتق از اسید سینامیک و در نهایت افزایش تجمع ترکیبات فنلی گردید (Samuolienė et al., 2011; Siriparu et al., 2022). از منظر فیزیولوژیکی، فعال‌سازی فیتوکروم‌ها توسط طیف قرمز و کریپتوکروم‌ها توسط طیف آبی موجب تقویت مسیره‌های فنیل‌پروپانوئید و فلاونوئید می‌شود (Wang et al., 2023). افزایش محتوای فنل کل در شبدر نسبت به ماش و گندم نیز بیانگر تفاوت‌های گونه‌ای در کارایی مسیره‌های بیوسنتز ترکیبات فنلی میان لگوم‌ها و غلات است (Mao et al., 2017). فرآیند جوانه‌زنی نیز طبق گزارش‌های پیشین با افزایش فعالیت PAL همراه بوده و تجمع ترکیبات فنلی را تسهیل می‌کند (Mao et al., 2017). یافته‌های این پژوهش و بررسی‌های پیشین تأیید می‌کند که ترکیب دمای ۲۸ درجه سلسیوس

جدول ۴- اثر نور بر مقدار فلاونوئید کل در جوانه‌ها

Table 4. Effect of light type on total flavonoid content in sprouts

گونه (Species)	نوع نور (Light type)	فلاونوئید کل Total Flavonoid Content (mg CE/g DW)
ماش (Mung bean)	سفید (White)	0.04 ± 0.95b
ماش (Mung bean)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.05 ± 1.12a
گندم (Wheat)	سفید (White)	0.03 ± 0.80b
گندم (Wheat)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.04 ± 1.06a
شبدر (Clover)	سفید (White)	0.04 ± 1.01b
شبدر (Clover)	قرمز-آبی (Red-blue)	0.06 ± 1.29a

میانگین‌هایی با حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌دار ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

در تولید تجاری جوانه‌ها یا کشت هیدروپونیک می‌تواند بهبود کیفیت متابولیت‌های ثانویه و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی محصول نهایی را افزایش دهد.

در مجموع، این نتایج تأیید می‌کند که نور قرمز-آبی همراه با دمای مناسب می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای تحریک مسیره‌های بیوسنتز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی در جوانه‌ها مطرح شود. استفاده از این شرایط

تفاوت گونه‌ای احتمالاً نشان‌دهنده نقش متفاوت مسیرهای دفاعی مبتنی بر پراکسیدها در گونه‌های مختلف است.

افزایش دما از ۲۳ به ۲۸ درجه سلسیوس باعث تحریک هر دو آنزیم شد، اما افزایش بیشتر دما تا ۳۱ درجه سلسیوس منجر به کاهش شدید فعالیت آنزیم‌ها گردید. این کاهش احتمالاً ناشی از دنا تورا سیون جزئی ساختار پروتئینی و کاهش پایداری آنزیم‌ها در دمای بالا است؛ پدیده‌ای که در گیاهان تحت تنش گرمایی پیش از این گزارش شده است (Lee et al., 2020).

این الگوها نشان می‌دهند که در دمای ۲۸ درجه سلسیوس و تحت نور قرمز-آبی، جوانه‌ها ضمن ایجاد سطحی کنترل شده از تنش اکسیداتیو، سیستم دفاعی آنزیمی خود را فعال کرده و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را به شکلی مؤثر افزایش می‌دهند. افزایش فعالیت CAT و POD، شاخص مهمی از فعال شدن شبکه پاکسازی رادیکال‌های آزاد (ROS-detoxification system) است؛ سیستمی که اختلال در آن می‌تواند منجر به آسیب اکسیداتیو و کاهش کیفیت زیستی شود (Sun et al., 2024; Yin et al., 2025).

مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که نور ترکیبی قرمز-آبی می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در جوانه‌ها و گیاهچه‌ها افزایش دهد؛ به‌طور مثال در جوانه‌های یونجه، استفاده از LED قرمز و آبی منجر به افزایش شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی شد (Sun et al., 2024).

مطالعه‌ای دیگر گزارش داده است که نسبت مطلوب نور قرمز به آبی (برای مثال ۴:۶) فعالیت POD و سایر آنزیم‌های دفاعی را در گیاهچه‌ها بهبود می‌بخشد (Meng et al., 2019).

افزایش فلاونوئید تحت نور قرمز-آبی احتمالاً ناشی از تحریک مسیر بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه توسط نور باکیفیت و القای فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند چالکون سنتاز (CHS) و چالکون ایزومراز (CHI) است. این آنزیم‌ها مراحل اولیه مسیر فلاونوئید را کنترل می‌کنند و افزایش فعالیت آن‌ها می‌تواند منجر به تجمع بیشتر فلاونوئیدها گردد. یافته‌های مشابهی در مطالعات اخیر گزارش شده‌اند که کیفیت نور LED تأثیر قابل توجهی بر افزایش فلاونوئید و سایر ترکیبات فنلی داشتند (Nam et al., 2017; et al., 2025).

مقایسه نور قرمز-آبی با نور سفید نشان داد که نور طیف ترکیبی تقریباً ۲۵ درصد موجب افزایش فلاونوئید کل شد. این افزایش هم‌راستا با روند افزایش فنل کل بود و نشان‌دهنده هم‌افزایی مسیرهای فنیل پروپانوئید و فلاونوئید تحت نور مناسب است. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده در گیاهان دارویی و ریزسبزی‌ها هم‌خوانی دارد (Ahadzadeh et al., 2023; Zhou et al., 2024).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (CAT و POD)

تجزیه واریانس نشان داد که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع نور، دما و اثرات متقابل بین آن‌ها قرار می‌گیرد ($P < 0.05$). بالاترین فعالیت آنزیمی در تیمار ترکیبی نور قرمز-آبی با دمای ۲۸ درجه سلسیوس مشاهده شد، در حالی که کمترین فعالیت مربوط به شرایط نور سفید و دمای ۲۳ درجه سلسیوس بود (جدول ۵).

به‌طور خاص، فعالیت CAT در جوانه ماش به‌طور معنی‌داری از جوانه‌های گندم و شبدر بیشتر بود و تحت نور قرمز-آبی تقریباً ۳۵٪ افزایش نشان داد. در مقابل، جوانه شبدر بیشترین فعالیت POD را داشت، که این

جدول ۵- اثر متقابل نور و دما بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در جوانه‌ها

Table 5. Effect of light type and temperature on antioxidant enzyme activities in sprouts

گونه (Species)	نور (Light type)	دما (°C)	CAT (U/mg protein)	POD (U/mg protein)
ماش (Mung bean)	سفید (White)	23	0.08 ± 2.16b	0.6 ± 15.2b
ماش (Mung bean)	قرمز-آبی (Red-blue)	28	1.10 ± 33.4a	0.9 ± 23.5a
گندم (Wheat)	سفید (White)	23	0.57 ± 18.9b	0.5 ± 13.1b
گندم (Wheat)	قرمز-آبی (Red-blue)	28	0.87 ± 29.2a	0.7 ± 20.4a
شبدر (Clover)	سفید (White)	23	0.68 ± 20.7b	0.6 ± 14.9b
شبدر (Clover)	قرمز-آبی (Red-blue)	28	1.11 ± 32.8a	0.8 ± 22.7a

میانگین‌هایی با حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌دار ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

بنابراین، یافته‌های ما با گزارش‌های اخیر هماهنگ است و تأکید می‌کند که ترکیب نور مناسب و دمای بهینه می‌تواند به عنوان یک رویکرد کارآمد برای تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش مقاومت جوانه‌ها در برابر تنش اکسیداتیو به کار رود.

روابط همبستگی بین شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی

تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که میان شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی اندازه‌گیری شده روابط مثبت، قوی و معنی‌داری وجود دارد ($P < 0.01$). همبستگی بسیار بالا میان ظرفیت مهار رادیکال آزاد و فنل کل، بیانگر آن است که ترکیبات فنلی مهم‌ترین نقش را در تعیین قدرت احیایی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی جوانه‌ها ایفا می‌کنند. این امر از آن جهت قابل توجه است که ترکیبات فنلی نخستین سد دفاعی در برابر تجمع رادیکال‌های آزاد محسوب

می‌شوند. علاوه بر این، همبستگی قابل توجه میان فنل کل و فلاونوئید کل نشان می‌دهد که مسیرهای بیوسنتزی این ترکیبات به صورت هماهنگ فعال می‌شوند و تحریک یکی از آن‌ها معمولاً با افزایش دیگری همراه است. این هماهنگی بیانگر آن است که در شرایط نوری و دمایی مناسب، مسیر فنیل پروپانویید با کارایی بیشتری عمل کرده و به تولید هم‌زمان ترکیبات آروماتیک احیاکننده منجر می‌شود (جدول ۶). این الگو در مجموع نشان می‌دهد که شاخص‌های غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدانی نه تنها مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند، بلکه بخشی از یک مسیر دفاعی مشترک هستند که در پاسخ به تنش اکسیداتیو یا شرایط رشد بهینه فعال می‌شود (Kaushik et al., 2017; Wang et al., 2023; Pasqualone et al., 2020).

جدول ۶- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی در جوانه‌ها

Table 6. Correlation coefficients among antioxidant indices in sprout

شاخص (Index)	DPPH	فنل کل (Total Phenol)	فلاونوئید کل (Total Flavonoid)	CAT	POD
DPPH	1	0.94	0.83	0.67	*0.59
فنل کل (Total Phenol)	0.94	1	0.88	0.71	*0.63
فلاونوئید کل (Total Flavonoid)	0.83	0.88	1	*0.65	*0.56
CAT	0.67	0.71	*0.65	1	0.81
POD	*0.59	*0.63	*0.56	0.81	1

جوانه‌ها نیز می‌شود (Mao et al., 2017; Siriparu et al., 2022; Sun et al., 2024; Lee et al., 2020).

نتیجه‌گیری

به طور کلی، یافته‌ها نشان داد که ترکیب دمای ۲۸ درجه سلسیوس و نور LED قرمز-آبی و فتوپریود ۱۶ ساعته مناسب‌ترین شرایط برای جوانه زنی و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ارتقای فعالیت آنزیم‌های دفاعی در جوانه‌های ماش و گندم و دمای ۲۳ درجه سلسیوس و نور قرمز-آبی و فتوپریود ۱۶ ساعته مناسب‌ترین شرایط برای جوانه زنی و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شبدر است. از آن جایی که شبدر حاوی ایزوفلاون‌ها (مانند جنستئین و دایزئین) است؛ این ترکیبات فنولی حساس به گرما هستند. در دماهای بالاتر از ۲۶°C زنجیره‌های فنولی شکسته می‌شوند و واکنش‌های اکسیداسیون غیرآنزیمی افزایش می‌یابند، در نتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی کاهش می‌یابد. در مقابل، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی ماش و گندم

در بررسی شاخص‌های آنزیمی نیز فعالیت کاتالاز و پراکسیداز با شاخص‌های غیرآنزیمی همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان دادند. این الگوی همبستگی حاکی از آن است که افزایش تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو همراه می‌شود و گیاه از هر دو مسیر برای ایجاد یک سازوکار دفاعی تلفیقی بهره می‌گیرد. همبستگی قوی میان دو آنزیم نیز نشان‌دهنده وجود یک شبکه دفاعی منسجم درون سلولی است که برای حفظ تعادل ردوکس، کاهش غلظت H_2O_2 و جلوگیری از تخریب بافتی فعال می‌شود. از دیدگاه فیزیولوژیکی، چنین هماهنگی میان سیستم‌های آنزیمی و غیرآنزیمی بیانگر آن است که گیاهچه‌ها در شرایط مطلوب نور-دما قادرند با فعال‌سازی هم‌زمان چند مسیر دفاعی، پاسخ مؤثرتری به استرس اکسیداتیو یا افزایش متابولیسم داشته باشند. این سازوکار تقویت‌شده نه تنها به کاهش آسیب اکسیداتیو کمک می‌کند، بلکه موجب افزایش کیفیت زیستی، توان نگهداری رطوبت، و ارزش تغذیه‌ای

ژن‌های مرتبط با مسیرهای فنیل پروپانوئید، ایزوفلاون‌ها و سازوکارهای دفاعی خانواده لگوم‌ها دانست. ویژگی‌های ژنتیکی خاص شبدر در تولید ترکیبات فنلی پیچیده‌تر، و در مقابل ظرفیت بالاتر ماش در فعال‌سازی سامانه‌های آنزیمی آنتی‌اکسیداتیو، ساختار متفاوت این پاسخ‌ها را توضیح می‌دهد (Pasqualone et al., 2020; Kafayatullah et al., 2020).

از نظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نورهای LED قابل تنظیم می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در سیستم‌های هیدروپونیک برای تولید صنعتی جوانه‌های غنی از آنتی‌اکسیدان مورد استفاده قرار گیرند. این روش علاوه بر افزایش راندمان تولید، موجب کاهش مصرف آب، کاهش احتمال آلودگی میکروبی، و کنترل دقیق ترکیبات تغذیه‌ای محیط رشد می‌شود. به‌ویژه در سیستم‌های بسته، امکان مدیریت هم‌زمان نور و دما فراهم است و می‌توان شرایط را به‌گونه‌ای بهینه کرد که جوانه‌ها حداکثر ظرفیت تغذیه‌ای را داشته باشند (Kumar et al., 2019).

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان سپاسگزاری می‌شود.

(مثل ویتامین C و اسید فرولیک) نسبتاً مقاوم‌تر به حرارت هستند، بنابراین در دمای بالاتر باقی می‌مانند و حتی بهتر سنتز می‌شوند.

در این شرایط، تعادل مطلوبی میان تولید گونه‌های فعال اکسیژن و سیستم‌های خنثی‌سازی آن‌ها برقرار می‌شود و ظرفیت ردوکس سلولی در بالاترین سطح قرار می‌گیرد. تحریک مسیرهای فیتوکروم-کریپتوکروم در اثر نور قرمز-آبی موجب فعال شدن ژن‌های کلیدی از جمله PAL, CHS, CAT و POD شده و در نتیجه، سنتز ترکیبات احیایی مانند فنل‌ها و فلاونوئیدها تقویت می‌شود. دمای ۲۸ درجه نیز با ایجاد پایداری ساختاری در آنزیم‌ها و افزایش کارایی انتقال الکترون در فرایند فتوسنتز گندم و ماش، شرایطی فراهم می‌کند که تولید ATP و NADPH—دو مولکول ضروری برای انجام واکنش‌های حیاتی—در سطح مطلوب تری انجام گیرد (Samuolienė et al., 2011; Wang et al., 2023).

مقایسه گونه‌ها نشان داد که جوانه شبدر بیشترین مقدار فنل و فلاونوئید را دارا بود، در حالی که جوانه ماش بالاترین فعالیت آنزیمی را نشان داد. این تفاوت‌های میان‌گونه‌ای را می‌توان ناشی از تفاوت در الگوهای بیان

منابع

- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105: 121–126. (**Journal**)
- Ahadzadeh, M., Pourbeyrami Hir, Y., Chamani, E., Maleki Lajayer, H., Shahi, A., & Hasanzadeh, M. 2023. Investigation on the effects of intensity and quality of LED lights on in-vitro regeneration & growth of yellow flag (*Iris pseudacorus*). *Journal of Plant Production Research*, 30 (4): 1–20. (**Journal**)
- Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M., & Nonogaki, H. 2016. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy* (3rd ed.). Springer. (**Book**)
- Bradford, K.J. 2018. Seed germination and dormancy. In Bewley, B., Bradford, K.J., Nonogaki, H., & Finch-Savage, J.M.M. (Eds.), *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy* (4th ed., pp. 439–481). Springer. (**Book Chapter**)
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., & Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 28 (1): 25–30. (**Journal**)
- Chance, B., & Maehly, A.C. 1955. Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2: 764–775. (**Journal**)
- Eshaghi, S.M.R., Ebrahimi, P., & Zand, B. 2013. Investigation of quantitative and qualitative characteristics of silage corn genotypes in Varamin region. *Electronic Journal of Crop Production*, 5 (4): 19–38. Retrieved February 20, 2013. <http://www.magiran.com/magtoc.asp?mgID=5543&number=20>. (**In Persian**)
- Food and Agriculture Organization. 2008. Statistics: FAOSTAT agriculture. Retrieved June 10, 2010 from <http://fao.org/crop/statistics>. (**Online Report**)
- Ghavidel, R.A., & Prakash, J. 2007. The impact of germination and dehulling on nutrients, antinutrients, and in vitro digestibility of legume seeds. *LWT – Food Science and Technology*, 40: 1292–1299. (**Journal**)

- Hoagland, D.R., & Arnon, D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular*, 347. **(Report)**
- Islam, T., Yu, X., & Xu, B. 2017. Phenolic profiles, antioxidant capacities and metal-chelating ability of edible sprouts: Effect of germination and thermal processing. *Food Chemistry*, 225: 122–132. **(Journal)**
- Jahani, M.R., & Chaichi, M.R. 1998. Effect of water salinity on germination of two barley cultivars. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 5 (3): 24–34. (In Persian)**(Journal)**
- Kafayatullah, S., Ahmad, S., & Waseem, K. 2020. Isoflavones in legumes: Occurrence, biosynthesis, and health benefits. *Journal of Functional Foods*, 67: 103835. **(Journal)**
- Kaushik, G., Satya, S., & Naik, S.N. 2017. Effect of germination on antioxidant activity and polyphenol content of cereals and pulses. *Food Research International*, 100: 256–262. **(Journal)**
- Kumar, N., Kumar, R., & Singh, D. 2019. Hydroponics technology for sustainable vegetable production: A review. *Journal of Horticultural Science*, 14 (2): 45–52. **(Journal)**
- Lee, S.H., Kim, J.H., & Park, J. 2020. Effect of temperature and light quality on antioxidant metabolism in lentil sprouts. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152: 79–88. **(Journal)**
- Maham, N., Chamani, E., Mohebodini, M., & Tariverdizadeh, N. 2025. Optimizing biosynthesis: The role of LED light spectra in regulating phenolic and flavonoid accumulation in *Matricaria chamomilla* L. root cultures. *BMC Plant Biology*, 25 (1): 1573. **(Journal)**
- Mao, J., Chen, X., & Li, Y. 2017. Nutritional and phytochemical composition of germinated seeds: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72: 123–130. **(Journal)**
- Meng, X., Wang, Z., He, S., Shi, L., Song, Y., Lou, X., & He, D. 2019. LED-supplied red and blue light alters the growth, antioxidant status, and photochemical potential of in vitro-grown *Gerbera jamesonii* plantlets. *Horticultural Science and Technology*, 37 (4): 473–489. **(Journal)**
- Nam, T.G., Kim, D.O., & Eom, S.H. 2018. Effects of light sources on major flavonoids and antioxidant activity in common buckwheat sprouts. *Food Science and Biotechnology*, 27 (1): 169–176. **(Journal)**
- Pasqualone, A., Bianco, A.M., Paradiso, V.M., Summo, C., & Caponio, F. 2020. Antioxidant properties of clover sprouts: Effects of germination and light exposure. *Food Chemistry*, 324: 126–142. **(Journal)**
- Primrose, S.B., & Old, R.W. 2001. *Principles of gene manipulation* (6th ed.). Blackwell Science Ltd. **(Book)**
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., & Duchovskis, P. 2011. The impact of LED illumination on antioxidant properties of sprouted seeds. *Scientia Horticulturae*, 129: 31–36. **(Journal)**
- Sies, H. 2015. Oxidative stress: A concept in redox biology and medicine. *Redox Biology*, 4: 180–183. **(Journal)**
- Siriparu, P., Rungsirivanich, P., & Phimphilai, M. 2022. Effect of light quality on antioxidant capacity of mung bean sprouts. *Journal of Plant Biochemistry*, 45 (2): 98–107. **(Journal)**
- Shahrajabian, M.H., Sun, W., & Cheng, Q. 2019. Sprouts: Current status, nutritional value and health benefits. *Czech Journal of Food Sciences*, 37: 403–410. **(Journal)**
- Wang, L., Zhao, Y., & Zhang, J. 2023. Red–blue LED illumination enhances antioxidant metabolism in wheat sprouts by regulating phenylpropanoid biosynthesis. *Plant Growth Regulation*, 101: 225–236. **(Journal)**
- Weeden, N.F. 1983. Plastid isozymes. In Tanksley, S.D. & Orton, T.J. (Eds.), *Isozymes in Plant Genetic and Breeding*. Elsevier Scientific Publication Co., Amsterdam, The Netherlands. pp: 139–156. **(Book Chapter)**
- Yin, C., Shi, Z., Li, D., Tian, C., Li, Y., Dong, W., & Zhang, Y. 2025. Red and blue photo-selective nets optimize leaf photostructure and photosynthetic efficiency to enhance antioxidant capacity, yield, and quality in adzuki bean. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1670702. **(Journal)**
- Zhang, J., Wang, C., Fang, W., Yang, R., & Yin, Y. 2024. Production of high-quality wheat sprouts of strong antioxidant capacity: Process optimization and regulation mechanism of red light treatment. *Foods*, 13 (17): 2703. **(Journal)**
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64 (4): 555–559. **(Journal)**



Evaluation of environmental conditions on the germination and antioxidant properties of mung bean, wheat, and clover seeds in a hydroponic system

Seyed Arian Moghaddas Tafreshi¹, Sahar Doaei^{2*}, Hadi Rahanandeh³

Received: December 16, 2025

Accepted: April 18, 2026

Abstract

Environmental temperature and light characteristics, particularly photoperiod duration and radiation spectrum, are critical determinants of seed germination and physiological regulation. Edible sprouts gain prominence in nutrition due to their rich content of phenolic compounds, flavonoids, and antioxidant enzymes. This research investigated the effect of three temperature levels (23, 28, and 31 °C), two photoperiods (12 and 16 hours), and two LED light types (white and red–blue) on the germination indices and antioxidant characteristics of mung bean, wheat, and clover sprouts grown hydroponically. Seeds were cultivated in a system using distilled water and aerated Hoagland nutrient solution on mesh trays, ensuring controlled ventilation and environmental conditions. The experiment followed a completely randomized factorial design with three replications. Measurements included germination percentage, antioxidant capacity (DPPH), total phenol, total flavonoid content, and the activity of catalase and peroxidase enzymes. Results demonstrated that temperature and light significantly influenced the physiological and biochemical responses of the sprouts. The 28 °C temperature yielded the highest germination across all three species. Wheat exhibited greater stability compared to mung bean and clover at 31 °C, while clover showed delayed germination at 23 °C. The red–blue light combined with the 16 hour photoperiod significantly increased antioxidant indices overall. Species patterns were mung bean displayed the highest antioxidant enzyme activity, wheat possessed the highest flavonoid content, and clover yielded the highest total phenol content. These findings show the need to harmonize temperature, light quality, and photoperiod regulation to optimize germination efficiency and enhance the overall nutritional value of these functional food sprouts.

Keywords: Total phenol; Total flavonoid; Antioxidant activity; Catalase and peroxidase; DPPH assay

How to cite this article

Moghaddas Tafreshi, S.A, Doaei, S. and Rahanandeh, H. 2026. Evaluation of environmental conditions on the germination and antioxidant properties of mung bean, wheat, and clover seeds in a hydroponic system. Iranian Journal of Seed Science and Research, 12(4): 15-26. (In Persian)(**Journal**)
DOI: [10.22124/jms.2026.9712](https://doi.org/10.22124/jms.2026.9712)

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research
The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. M.Sc. Graduate, Department of Food Science and Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. aryanmoghaddastafreshy@gmail.com

2. Assistant Professor, Department of Agriculture, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. s.doaei@liau.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Plant protection, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. rahanandeh@iau.ac.ir

*Corresponding author: s.doaei@liau.ac.ir