Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

(OPEN ACCESS)

Investigating the effects of heat shock, osmotic stress and drying methods on the viability of safflower primed seeds during deterioration period

Abdolhosein Rezaei[1], Farshid Ghaderi-Far[*2], Hamid Reza Sadeghipour[3]

1. Ph.D. Graduate of Crop Physiology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosainrezai@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: farshidghaderifar@yahoo.com
3. Professor, Dept. of Biology, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: h.r.sadeghipour@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 12.07.2024
Revised: 02.10.2025
Accepted: 03.17.2025

Keywords:
Controlled deterioration,
Seed enhancement treatments,
Seed longevity,
Storage

ABSTRACT

Background and Objectives: In recent decades, seed priming has become a popular technique for enhancing germination rate and uniformity in the field, as well as promoting better seedling establishment and faster adaptation to adverse environmental conditions during germination and seedling growth. However, the practical application of this method has been limited due to the decline in seed quality and longevity associated with priming. Thus, this study aims to investigate the impact of post-priming treatments, such as heat shock, osmotic stress, and drying methods, on the longevity of safflower seeds under various deterioration periods.

Materials and Methods: In this study, the seeds of the Sina cultivar were used. First, the seeds were immersed in distilled water (hydro) and salicylic acid solution. After the completion of the imbibed phase, they were subjected to heat shock treatments (1.5, 3 and 8 hours at 45 °C), osmotic stress (-1.5 and -2.5 MPa applied by polyethylene glycol), and two slow and fast drying methods. The treatment without priming was also considered as a control. Finally, the seeds were subjected to controlled deterioration for 0, 2, 4, and 6 days at 45 °C.

Results: The results indicated that as the duration of deterioration increased, the germination ability and seedling growth decreased. In the treatment where deterioration lasted for 6 days, the seeds died completely. The decline in quality of primed seeds was more severe under the conditions of heat shock and osmotic stress after priming, compared to the control seeds. However, heat shock (8 hours) resulted in improved quality of the primed seeds compared to shorter heat shock durations. The primed seeds with salicylic acid and distilled water (hydro) showed f 13% and 10% increase compared to the control treatment, respectively. Applying drying treatments after priming, without the use of heat shock and osmotic stress treatments, resulted in maintaining and even increasing the germination and seedling growth of primed seeds compared to unprimed

seeds at various levels of deterioration. Both drying methods improved the germination and seedling growth of primed seeds, resulting in greater germination and seedling growth compared to non-primed seeds.

Conclusion: In general, it is advisable to employ an appropriate method to dry primed safflower seeds in order to maintain or enhance their longevity during the priming process and after the completion of the soaking period.

Cite this article: Rezaei, Abdolhosein, Ghaderi-Far, Farshid, Sadeghipour, Hamid Reza. 2026. Investigating the effects of heat shock, osmotic stress and drying methods on the viability of safflower primed seeds during deterioration period. *Journal of Plant Production Research*, 32 (4), 1-22.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jopp.2025.22650.3166
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

بررسی اثرات شوک حرارتی، تنش اسمزی و روش‌های خشک‌کردن بر قابلیت حیات بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ در طی زوال

عبدالحسین رضائی[۱]، فرشید قادری‌فر*[۲]، حمیدرضا صادقی‌پور[۳]

۱. دانش‌آموخته دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: abdolhosainrezai@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: farshidghaderifar@yahoo.com

۳. استاد گروه زیست‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: h.r.sadeghipour@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

واژه‌های کلیدی:
انبارداری،
تیمارهای بهبود بذر،
زوال کنترل‌شده،
طول عمر بذر

چکیده

سابقه و هدف: در چند دهه اخیر، پیش‌آماده‌سازی بذر به‌عنوان یک روش متداول به‌منظور افزایش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی در مزرعه، استقرار بهتر گیاهچه‌ها و عبور سریع‌تر از شرایط نامساعد محیطی در زمان جوانه‌زنی و سبزشدن موردتوجه قرارگرفته است. بااین‌وجود، کاهش کیفیت و طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده، استفاده عملی از این روش را محدود ساخته است. ازاین‌رو، هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر کاربرد برخی از تیمارهای پس از پیش‌آماده‌سازی شامل شوک حرارتی، تنش اسمزی و روش‌های خشک‌کردن بر طول عمر بذرهای گلرنگ در طی دوره‌های مختلف زوال است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از بذرهای رقم زراعی سینا استفاده شد. بذرها ابتدا در آب مقطر (هیدرو) و نیز محلول اسید سالیسیلیک غوطه‌ور شدند و پس از اتمام مرحله آب‌نوشی تحت تیمارهای شوک حرارتی (۱/۵ و ۳ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۸ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، تنش اسمزی (۱/۵- و ۲/۵- مگاپاسکال به‌وسیله پلی‌اتیلن گلایکول) و دو روش خشک‌کردن آرام و سریع قرار گرفتند. تیمار بدون پیش‌آماده‌سازی نیز به‌عنوان شاهد درنظر گرفته شد. درنهایت بذرها تحت زوال کنترل‌شده به مدت ۰، ۲، ۴ و ۶ روز قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش طول دوره زوال، قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه کاهش یافت و در تیمار ۶ روز زوال مرگ کامل بذرها رخ داد. شدت کاهش کیفیت بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در شرایط اعمال شوک حرارتی و تنش اسمزی پس از پیش‌آماده‌سازی همواره بیش‌تر از بذرهای شاهد بود. در سطح زوال ۲ روز، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی

و گیاهچه طبیعی برای بذور شاهد به‌ترتیب ۸٤ درصد، ۰/۰۲۷ بر ساعت، ۷۰/٦۷ درصد مشاهده شد. بااین‌وجود، شوک حرارتی به مدت ۸ ساعت منجر به بهبود کیفیت بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در مقایسه با زمان‌های کم‌تر شوک حرارتی شد. شوک حرارتی در تیمارهای پیش‌آماده‌سازی شده با اسید سالیسیلیک و آب مقطر (هیدرو) به‌ترتیب ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد وجود داشت. عدم استفاده از شوک حرارتی و تنش اسمزی و تنها اعمال تیمارهای خشک‌کردن پس از پیش‌آماده‌سازی منجر به حفظ و حتی افزایش قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده نسبت به بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی در سطوح مختلف زوال شد. هر دو روش خشک‌کردن باعث بهبود قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده شدند، به‌طوری‌که قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده یا بیشتر از بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی توصیه می‌شود که به‌منظور حفظ و یا افزایش طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ در طی پیش‌آماده‌سازی و پس از اتمام دوره آب‌نوشی، بذرها با روش مناسب خشک شوند.

استناد: رضائی، عبدالحسین، قادری‌فر، فرشید، صادقی‌پور، حمیدرضا (۱۴۰۴). بررسی اثرات شوک حرارتی، تنش اسمزی و روش‌های خشک‌کردن بر قابلیت حیات بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ در طی زوال. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۲ (۴)، ۲۲-۱.
DOI: 10.22069/jopp.2025.22650.3166

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از قدیمی‌ترین محصولاتی است که برای مناطق نیمه‌خشک سازگار شده است که به‌دلیل استفاده از گل‌های آن به‌عنوان رنگ طبیعی، طعم غذا به‌غیراز خواص دارویی متعدد کشت می‌شود (۱).

پیش‌آماده‌سازی بذر روشی ارزشمند برای بهبود جوانه‌زنی و سبزشدن در شرایط بهینه و تنش است. هم‌چنین برای بازگرداندن اثرات نامطلوب پیری پس از نگهداری مفید است (۲). به‌طور معمول پیش‌آماده‌سازی[1] بذر به‌عنوان یک روش متداول به‌منظور افزایش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی در مزرعه، استقرار بهتر گیاهچه‌ها و عبور سریع‌تر از شرایط نامساعد محیطی در زمان جوانه‌زنی و سبزشدن موردتوجه قرارگرفته است (۳). بااین‌وجود، زمانی که بذرها پس از پیش‌آماده‌سازی خشک می‌شوند تا به رطوبت اولیه برسند، ممکن است برخی از این اثرات مثبت کاهش یابد (٤ و ٥). حتی زمانی که کیفیت بذرها در طی خشک‌شدن حفظ شود، بخش قابل‌توجهی از آن در طی انبارداری از دست می‌رود (٦). مانع اصلی برای کاربرد عملی بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده، بحث انبارداری و زنده‌مانی است (۷). پیش‌آماده‌سازی بذر غالباً باعث کاهش قابلیت انبارداری بذرها می‌شود (۵). گزارش‌های متعددی از کاهش قابلیت ماندگاری بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در گیاهان مختلف توسط پژوهش‌گران ارائه‌شده است. به‌عنوان‌مثال، در بذرهای فلفل (٦)، برنج (۸ و ۹)، سویا (۱۰) و گوجه‌فرنگی (۱۱) پیش‌آماده‌سازی باعث تشدید فرایند زوال و درنهایت کاهش طول عمر بذرها شد. به‌نظر می‌رسد که تیمارهای پیش‌آماده‌سازی باعث مختل‌شدن سازوکارهای مربوط به طول عمر می‌شوند. سانو و سئو (۲۰۱۹) بیان کردند که در بذرهای آرابیدوپسیس پیشرفت چرخه‌های سلولی در طی پیش‌آماده‌سازی بذر باعث کاهش طول عمر بذر می‌شود (۹).

از طرفی، گزارش‌هایی نیز از تأثیر مثبت پیش‌آماده‌سازی بر بهبود ماندگاری بذرها وجود دارد. برای مثال در بذرهای زیره سبز (۱۲)، پنبه (۱۳)، برنج (١٤ و ١٥)، بامیه (١٦)، بومادران (۱۷)، آفتابگردان (۱۸ و ۱۹) و پیاز (۲۰) پیش‌آماده‌سازی موجب کاهش زوال و درنتیجه افزایش طول عمر بذرها شد. این تناقض توسط پژوهش‌گران مختلف موردبررسی قرارگرفته و برخی از پژوهش‌گران معتقدند، می‌توان اثرات زیان‌بار پیش‌آماده‌سازی بر قابلیت انبارداری بذرها را تا حد زیادی با اعمال تیمارهای مختلف و هم‌چنین، روش‌های متفاوت خشک‌کردن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده کاهش داد و از اثرات مثبت این تکنیک بهره جست (۱۱ و ۲۱). کاهش کیفیت بذرها در روش‌های رایج پیش‌آماده‌سازی به دلیل از دست رفتن تحمل به پسابیدگی بذرها و درنتیجه کاهش طول عمر آن‌ها می‌باشد (۲۲) که به‌طور عمده به شرایط دما، رطوبت و ترکیب جوی بستگی دارد که بذرها بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی در آن نگهداری می‌شوند (۲۳). بااین‌حال، چندین روش پس از پیش‌آماده‌سازی برای بهبود اثرات منفی پیش‌آماده‌سازی معمولی بر طول عمر بذر توسعه داده‌شده است (٢٤).

بروگینک و همکاران (۱۹۹۹) با فرض این‌که سازوکارهای مربوط به طول عمر بذر و تحمل به تنش آبی با یکدیگر مرتبط هستند، بیان کردند که احتمالاً تیمارهایی که تحمل به تنش آبی را در بذرها القا می‌کنند، باید تأثیر مثبتی بر طول عمر بذر داشته باشند و از تیمارهای مختلفی مانند شوک حرارتی استفاده

1- Seed priming

کردند (۲۱). شوک حرارتی اغلب به‌عنوان افزایش دما فراتر از حد آستانه برای یک دوره زمانی تعریف می‌شود. به‌طورکلی، افزایش موقت دما، معمولاً ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای محیط، شوک حرارتی در نظر گرفته می‌شود (۲۵). قرار دادن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده (هیدرو) کاهو در معرض دماهای ۳۷ (به مدت ٤ ساعت) و ٤۰ (به مدت ۲ ساعت) درجه سانتی‌گراد طول عمر بذرها را به‌ترتیب تا ۱۱ و ۱۰ روز در طی زوال کنترل‌شده افزایش داد (٢٤). اعمال تیمار شوک حرارتی پس از پیش‌آماده‌سازی باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی، افزایش طول عمر بذر و حفظ بنیه در طول نگهداری بذر گوجه‌فرنگی پیش‌آماده‌سازی شده شد (۱۱). نگهداری بذرهای گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) در دماهای ۳۷ یا ٤۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ تا ٤ ساعت بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی باعث افزایش طول عمر بذرها شد (٢٦). در چاودار کوهی (*Secale montanum*) نیز اعمال تیمار شوک حرارتی پس از پیش‌آماده‌سازی باعث افزایش طول عمر بذرها، افزایش درصد جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر شد (۲۷).

اعمال تنش اسمزی بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی روش دیگری برای افزایش طول عمر بذرها محسوب می‌شود (۲۱). در تنش اسمزی، بذرها بلافاصله پس از اعمال پیش‌آماده‌سازی در داخل محلول‌هایی با پتانسیل اسمزی پایین، مانند پلی‌اتیلن گلایکول به مدت چند ساعت و یا چند روز قرار می‌گیرند و درنهایت خشک می‌شوند (۲۸). بذرها طی پیش‌آماده‌سازی در دو مرحله با تنش جزئی مواجه می‌شوند که یکی در مرحله آب‌نوشی و دیگری در مرحله خشک‌شدن (پسابیدگی)[1] پس از آب‌نوشی صورت می‌گیرد و به‌طورکلی، وقوع تنش جزئی در طی پیش‌آماده‌سازی باعث می‌شود که بذرها در مراحل بعدی جوانه‌زنی و سبز شدن در مواجه با تنش‌های محیطی کارکرد بهتری داشته باشند (۲۹).

روش خشک‌کردن بذرها پس از یک دوره جذب آب در طی پیش‌آماده‌سازی نیز نقش مهمی در تعیین طول عمر و کیفیت بذرها در طی ذخیره‌سازی دارد (۲۱). خشک‌کردن دوباره پس از پیش‌آماده‌سازی برای نگهداری بذر، حفظ ماندگاری بذر و تحمل نسبت به تنش‌های غیرزیستی بسیار مهم است (۳۰). برای خشک‌کردن بذرها پس از پیش‌آماده‌سازی می‌توان از دو روش خشک‌کردن سریع و یا آهسته استفاده کرد (۳۱). درروش خشک‌کردن سریع بذرها در محیطی با رطوبت نسبی پایین (حدود ۳۰ درصد)، دمای بالا (٤۰–۳۰ درجه سانتی‌گراد) و یا هر دو قرار می‌گیرند (۲۳). بدین‌منظور ممکن است از ظرف‌های مهروموم شده حاوی محلول‌های نمکی مانند کلسیم کلراید (این ترکیب رطوبت نسبی ظرف را در حد ۳۳ درصد حفظ می‌کند) که رطوبت نسبی محیط را تا حد زیادی کاهش می‌دهند و قرار دادن آن‌ها در دمای بالا به‌مدت چند ساعت استفاده شود؛ درروش خشک‌کردن آهسته، بذرها در محیطی با رطوبت نسبی بالا (بیش از ۷۰ درصد) خشک می‌شوند (۳۲ و ۲۳). در این روش خشک شدن بذرها می‌تواند با قرار دادن بذرها در هوای آزاد و با استفاده از پنکه یا تهویه صورت گیرد درمجموع، هر روشی که باعث شود محتوای رطوبت بذرها پس از پیش‌آماده‌سازی به‌سرعت کاهش یابد، روش سریع و هر روشی که باعث شود محتوای رطوبت بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با سرعت کم‌تر و درواقع در زمان بیش‌تری به مقدار اولیه خود (محتوای رطوبت بذر قبل از پیش‌آماده‌سازی) برسد، روش آهسته تلقی می‌شود (۳۱). سودا و همکاران

1- Desiccation

(۲۰۰۵) گزارش کردند که خشک‌کردن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده کلم با روش‌های مختلف باعث بیان الگوهای ژنی متفاوتی در بذرها می‌شود که می‌تواند باعث تولید پروتئین‌های مختلفی شود؛ ازاین‌رو، نحوه خشک‌کردن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در واکنش نسبت به شرایط محیط نگهداری و به‌دنبال آن جوانه‌زنی بسیار حائز اهمیت است (۳۳). اسشومبر و برادفورد (۲۰۰۵) بیان کردند که بذرهای کاهو که پس از پیش‌آماده‌سازی با روش آهسته خشک شدند از سرعت جوانه‌زنی بالاتری برخوردار بودند، اما قابلیت زنده‌مانی در بذرهای خشک‌شده با روش سریع بیش‌تر بود (۲۳). در بذرهای گوجه‌فرنگی و کرفس عکس آن رخ داد و خشک‌کردن بذرها به‌وسیله روش آهسته باعث افزایش قابلیت ماندگاری بذرها در مقایسه با روش خشک‌کردن سریع شد (۲٦ و ۳٤). دیمیر و همکاران (۲۰۰۵) نیز بیان کردند که بنیه و طول عمر بذرهایی که بعد از پیش‌آماده‌سازی توسط روش‌های آهسته خشک می‌شوند، بیش‌تر است (۳۲).

ازآن‌جایی‌که بهینه‌سازی پیش‌آماده‌سازی بذر و هم‌چنین روش‌های افزایش کارایی این روش روی گیاه دانه‌روغنی گلرنگ به‌عنوان یک گیاه صنعتی و بومی ایران می‌تواند بسیار دارای اهمیت باشد که این موضوع ذخیره‌سازی بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده را برای مدت‌زمان طولانی‌تری فراهم می‌نماید که امکان استفاده عملی از پیش‌آماده‌سازی را در کشاورزی فراهم نماید، بنابراین این مطالعه باهدف بررسی اثرات پیش‌آماده‌سازی (آب مقطر (هیدرو) و هورمون اسید سالیسیلیک) و تیمارهای پس از پیش‌آماده‌سازی شامل شوک حرارتی، تنش اسمزی و روش‌های خشک‌کردن و دستیابی به روش بهینه بر کیفیت بذرهای رقم سینا گلرنگ در طی زوال مصنوعی انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد و محل انجام آزمایش: در این پژوهش از بذرهای گلرنگ رقم سینا استفاده شد. بذرهای گلرنگ از مؤسسه کنترل، ثبت و گواهی نهال و بذر کرج تهیه شد. بذرهای رقم مذکور در مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در تاریخ ۱۲ اسفند سال ۱۳۹۷ کشت شدند. در زمان رسیدگی بذرها به‌صورت دستی برداشت شدند و جهت اعمال تیمارهای پیش‌آماده‌سازی و پس از پیش‌آماده‌سازی به آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل شدند.

اعمال تیمارهای پیش‌آماده‌سازی: در این پژوهش برای پیش‌آماده‌سازی بذرهای گلرنگ از آب مقطر (هیدرو) به‌عنوان سطح صفر و هورمون اسید سالیسیلیک (۵۰ پی‌پی‌ام) استفاده شد. تیمار بدون پیش‌آماده‌سازی نیز به‌عنوان شاهد درنظر گرفته شد. درروش پیش‌آماده‌سازی، بذرها درون بشر به حالت غوطه‌ور در آب با نسبت ۱ به ۵ (به ازای هر گرم بذر ۵ میلی‌لیتر آب استفاده شد) به مدت ٦ ساعت قرار گرفتند. در طی مدت آب‌نوشی به‌منظور اکسیژن‌رسانی و جلوگیری از خسارات ناشی از کمبود اکسیژن، هوادهی با استفاده از پمپ آکواریوم صورت گرفت (۳۵). هوادهی به‌صورتی انجام شد که بذرها در طی آب‌نوشی به‌صورت معلق در آب بودند. تیمار شاهد (بدون پیش‌آماده‌سازی) نیز اعمال شد.

روش‌های خشک‌کردن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده: پس از اتمام پیش‌آماده‌سازی، بذرها با دو روش آرام و سریع خشک شدند (۲۱). درروش سریع، بذرها در ظرف‌های وکیوم با ابعاد ٤×۹×۱۳ با استفاده از توری سیمی روی ۱۵۰ گرم سیلیکاژل قرار گرفتند

تا رطوبت بذرها کاهش یابد و به رطوبت اولیه برسد. درروش آرام ابتدا بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده روی توری سیمی در ظرف‌های وکیوم حاوی ٤٠ میلی‌لیتر محلول اشباع سدیم کلرید به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. پس از گذشت این زمان، بذرها از این محیط خارج و به ظرف‌های حاوی سیلیکاژل منتقل شدند تا به رطوبت اولیه خود برسند. لازم به ذکر است که هر دو روش خشک‌کردن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت.

اعمال تیمارهای شوک حرارتی و تنش اسمزی در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده: تیمارهای این بخش با توجه به روش بروگینک و همکاران (۱۹۹۹) باکمی تغییرات طراحی و اجرا شد. به‌منظور اعمال شوک حرارتی به بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده به دو صورت عمل گردید (۲۱):

روش اول: بذرها بلافاصله پس از اتمام آب‌نوشی (پیش‌آماده‌سازی) به لوله‌های فالکون ١٤ میلی‌لیتری منتقل شدند و به مدت ۱/۵ و ۳ ساعت در بن ماری با دمای ٤٥ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از اتمام این مدت بذرها توسط روش سریع خشک شد.

روش دوم: بذرها پس از اتمام پیش‌آماده‌سازی در ظرف‌های وکیوم توسط توری سیمی روی ۱۵۰ گرم سیلیکاژل قرار گرفتند و به مدت ۸ ساعت در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد خشک شد. لازم به ذکر است که رطوبت بذرها طی این مدت به مقدار اولیه خود رسید.

به‌منظور اعمال تیمارهای تنش اسمزی، بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده بلافاصله به پتری‌دیش‌های شیشه‌ای با قطر ١٤ سانتی‌متر و یک‌لایه کاغذ صافی، حاوی ۱۵ میلی‌لیتر محلول پلی‌اتیلن گلایکول ٦٠٠٠ با پتانسیل‌های آب ۱/۵- و ۲/۵- مگاپاسکال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند. پس از گذشت ۷۲ ساعت، بذرهای تیمارهای مختلف توسط آب مقطر شسته شدند و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به روش سریع خشک شدند.

آزمون زوال کنترل‌شده: آزمون زوال کنترل‌شده با استفاده از روش بروگینک و همکاران (۱۹۹۹) باکمی تغییرات طراحی و اجرا شد (۲۱). پس از اعمال تیمارهای مختلف و هم‌چنین روش‌های خشک‌کردن، بذرهای هر تیمار به‌طور جداگانه توسط توری سیمی درون ظرف‌های وکیوم حاوی ٤٠ میلی‌لیتر محلول اشباع سدیم کلرید قرار گرفتند (مشابه با روش خشک‌کردن آرام) و به مدت ٤٨ ساعت به دمای ۵ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند. این کار باعث شد که رطوبت بذرها افزایش یابد و به مقدار ۲۰ درصد (برمبنای وزن‌تر) برسد. سپس بذرها در لوله‌های فالکون ۵۰ میلی‌متری قرار گرفت. به‌منظور اطمینان از عدم تبادل رطوبت بذرها با محیط بیرون درب فالکون‌ها توسط چسب پلاستیکی پلمپ شد. فالکون‌ها به بن‌ماری با دمای ٤٥ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند و به مدت ٦ روز نگهداری و در فواصل مختلف از تیمارهای بذری نمونه‌گیری و آزمون جوانه‌زنی روی بذرها انجام شد.

آزمون جوانه‌زنی: آزمون جوانه‌زنی در تمامی تیمارهای آزمایش در سه تکرار انجام شد. به این منظور سه تکرار ۲۵ بذری از هر تیمار درون پتری‌دیش‌هایی با قطر ۹ سانتی‌متر و حاوی یک‌لایه کاغذ صافی و ۵ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت و به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شد. شمارش بذرهای جوانه‌زده در طی روز ۲ تا ۳ بار انجام شد. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه و رسیدن طول آن به ۲ میلی‌متر یا بیش‌تر در نظر گرفته شد (٣٦). هم‌چنین، در پایان آزمون تعداد گیاهچه‌های طبیعی در طول آزمون شمارش شد. گیاهچه‌هایی طبیعی درنظر گرفته شدند که اندام اصلی آن‌ها (ریشه‌چه و ساقه‌چه)،

به‌طور کامل و طبیعی رشد کرده بودند (۳۶). در پایان طول گیاهچه‌های طبیعی به‌وسیله خط‌کشی با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین، وزن خشک گیاهچه‌های طبیعی پس از خشک‌کردن گیاهچه‌ها در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ٤٨ ساعت اندازه‌گیری شد. درنهایت میانگین طول گیاهچه و وزن خشک گزارش شد.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها: به‌منظور توصیف تغییرات درصد جوانه‌زنی در مقابل زمان (ساعت) از مدل لجیستیک سه پارامتر (رابطه ۱) استفاده شد (۳٤).

$$y = \frac{G\max}{1+(\frac{t}{T_{50}})^b} \qquad (۱)$$

در این رابطه، y درصد جوانه‌زنی تجمعی در زمان t، Gmax حداکثر درصد جوانه‌زنی تجمعی، b یکنواختی جوانه‌زنی (تندی شیب منحنی) و T50 زمان تا رسیدن به ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی می‌باشد. پس از برازش مدل لجیستیک به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برای هر تیمار، زمان تا رسیدن به ۲۰ درصد جوانه‌زنی بر اساس جمعیت بذری (T_{20}^{SP})[1] با استفاده از پارامترهای مدل طبق روش ارائه‌شده توسط قادری‌فر و گرزین (۱۳۹۸) محاسبه شد (۳۱). در مرحله بعد با معکوس کردن T_{20}^{SP} سرعت جوانه‌زنی محاسبه شد (رابطه ۲):

$$R_{20}^{SP} = \frac{1}{T_{20}^{SP}} \qquad (۲)$$

در این رابطه، R_{20}^{SP} سرعت جوانه‌زنی بر اساس زمان تا رسیدن به ۲۰ درصد جوانه‌زنی بر اساس جمعیت بذری می‌باشد. علت استفاده از T_{20}^{SP} به‌جای T50 (زمان تا رسیدن به ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی) پرهیز از مقایسه صدک‌های مختلف برای جوانه‌زنی به‌دلیل تفاوت در حداکثر درصد جوانه‌زنی در دماهای مختلف بود.

تمامی تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از برنامه آماری SAS 9.0.1 انجام شد و برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ استفاده شد. تمام آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل سه عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شدند و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون LSD استفاده گردید (۳۷).

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر ساده هر یک از عوامل آزمایشی پیش‌آماده‌سازی، زوال، شوک حرارتی، برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه معنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش طول دوره زوال درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، درصد گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه در بذرهای شاهد و پیش‌آماده‌سازی شده کاهش یافت و در سطح ٦ روز زوال به صفر رسید (شکل ۱).

1- Time to 20 % of germination based on seed population

جدول ۱- تجزیه واریانس درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، درصد گیاهچه‌های طبیعی، طول و وزن خشک گیاهچه گلرنگ تحت‌تأثیر پیش‌آماده‌سازی، زوال و شوک حرارتی.

Table 1. Analysis of variance for germination percentage, germination rate, normal seedling percentage, seedling length and dry weight of safflower seedling under priming, controlled deterioration and heat shock.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	گیاهچه طبیعی Normal seedling	طول گیاهچه seedling Length	وزن خشک گیاهچه Dry weight of seedling
زوال Deterioration	3	28794**	0.0082**	1934**	334**	286**
پیش‌آماده‌سازی Priming	2	3582**	0.00059**	3361**	7.44**	3.05**
شوک حرارتی Heat shock	2	386**	0.00021**	641**	9.52**	3.01**
زوال × پیش‌آماده‌سازی D × P	6	1521**	0.00021**	1262**	29**	18**
زوال × شوک حرارتی D × H	6	81**	0.0001**	373**	5.36**	1.4*
پیش‌آماده‌سازی × شوک حرارتی P × H	4	175**	0.000061**	221**	3.01**	3.88**
زوال × پیش‌آماده‌سازی × شوک حرارتی D × P × H	12	81**	0.000033**	154**	3.92**	2.84**
خطای آزمایش Error	72	10.92	0.0000005	5.84	0.14	0.52
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	9.31	4.20	8.47	9.32	17.72

* و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد

* and ** indicate significance at 5 and 1 % probability levels, respectively

در سطح زوال صفر، شوک حرارتی به مدت ۸ ساعت در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده به‌ترتیب با آب مقطر (هیدرو) و هورمون اسید سالیسیلیک باعث افزایش درصد جوانه‌زنی به میزان ۱۰ و ۱۳ درصد، سرعت جوانه‌زنی به میزان ۲۲/۵ و ۳۷/۵ درصد گردید و هم‌چنین پیش‌آماده‌سازی بذرها با آب مقطر (هیدرو) و با هورمون، درصد گیاهچه طبیعی را به میزان ۱۵ و ۲۰ درصد، طول گیاهچه را به میزان ۷۸/٦۰ و ۱۲۰ درصد و وزن خشک گیاهچه را ۲۹/۷۸ و ٤۷/۹۱ درصد در مقایسه با شاهد افزایش دادند. در تیمار ۲ روز زوال، بذرهای شاهد در مقایسه با بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده از درصد جوانه‌زنی (۸٤ درصد)، سرعت جوانه‌زنی (۰/۰۲۷ بر ساعت) و درصد گیاهچه طبیعی (۷۰/٦۷ درصد) بالاتری داشتند، اما طول گیاهچه (۵۰/۲۲ میلی‌متر) و وزن خشک گیاهچه (۵/۱٦ میلی‌گرم) پایین‌تری را دارا بودند (شکل ۱). به‌طورکلی، در هر یک از عوامل آزمایشی پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو) و هورمون و افزایش زمان شوک حرارتی باعث افزایش هر یک از صفات موردبررسی شد، هرچند که در برخی موارد اختلاف بین زمان‌های شوک حرارتی معنی‌دار نبود. در تیمار ٤ روز زوال، بذرهای شاهد، درصد جوانه‌زنی (۳۵ درصد)، سرعت جوانه‌زنی (۰/۰۱۸ بر ساعت)، درصد گیاهچه طبیعی (۲۹/۳۳ درصد)، طول گیاهچه (۵۲ میلی‌متر) و وزن خشک گیاهچه (۵/۳۹ میلی‌گرم) بالاتری در مقایسه با بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده + شوک حرارتی

برخوردار بودند. هم‌چنین، در تیمار ٤ روز زوال، بالاترین درصد جوانه‌زنی (۲۵ درصد)، سرعت جوانه‌زنی (۰/۰۰۹ بر ساعت)، درصد گیاهچه طبیعی (۱۲ درصد)، طول گیاهچه (۳۳ میلی‌متر) و وزن خشک گیاهچه (۳/٤٤ میلی‌گرم) در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با آب مقطر (هیدرو) در تیمار شوک حرارتی ۸ ساعت و در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با هورمون در تیمار شوک حرارتی ۳ ساعت (٤/۸۳ میلی‌گرم) مشاهده شد (شکل ۱).

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، در شرایط کاربرد شوک حرارتی به‌عنوان تیمارهای پس از پیش‌آماده‌سازی، شدت کاهش قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده بیش‌تر از بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی بود (شکل ۱). به‌طورکلی، زوال بذر با تغییرات مختلف سلولی، متابولیکی و شیمیایی ازجمله پراکسیداسیون لیپیدها، اختلال در غشاها، آسیب DNA، اختلال در RNA و تولید پروتئین همراه است و اثرات مضر بسیاری روی بذر ایجاد می‌کند (۳۸). انبارداری بذر باعث کاهش محتوای پروتئین می‌شود که ممکن است مرتبط با اکسیداسیون اسیدهای آمینه ناشی از افزایش فعالیت تنفسی و پیشرفت درروند زوال بذرهای ذخیره‌شده باشد (۱۲). هنگامی‌که در طی پیش‌آماده‌سازی به بذرها اجازه داده می‌شود آب جذب کنند، تحمل به پسابیدگی به‌تدریج کاهش‌یافته و خشک‌کردن بذرها منجر به ایجاد اثرات مخرب در ساختار بذر می‌گردد (۳۹). این موضوع می‌تواند در کاهش قابلیت انبارداری بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده مؤثر باشد. بااین‌حال، بسته به تیمار پیش‌آماده‌سازی و نوع روش خشک‌کردن می‌توان طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده را افزایش داد (۲۷).

اعمال تیمار شوک حرارتی بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی تنها در تیمار بدون زوال (صفر روز زوال) باعث برتری بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده نسبت به بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی شد، اما با وقوع دوره‌های مختلف زوال، بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی از قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بالاتری برخوردار بودند (شکل ۱). بااین‌وجود، استفاده از تیمار شوک حرارتی به مدت ۸ ساعت باعث بهبود قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در تیمارهای ۰ و ۲ روز زوال در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با آب مقطر (هیدرو) و هورمون در مقایسه با زمان‌های کم‌تر شوک حرارتی شد؛ البته در سطوح ۲ و ٤ روز زوال برای بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با اسید سالیسیلیک شوک حرارتی به‌مدت ۳ ساعت کارایی بهتری داشت (شکل ۱). درواقع بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده دارای سازوکارهای مربوط به طول عمر (تحمل به پسابیدگی) هستند که توسط تیمار پیش‌آماده‌سازی مختل می‌شود (٤۰). به‌عنوان مثال، نشان داده شد که در بذرهای برنج پیش‌آماده‌سازی شده، از دست دادن طول عمر با کاهش سوخت‌وساز نشاسته، تجمع مالون‌دی‌آلدهید و کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همراه است (٤۱ و ۳۳). مطالعه اثرات شوک حرارتی بر کیفیت و طول عمر بذرهای گوجه‌فرنگی نشان داد که شوک حرارتی از طریق افزایش سطح mRNA ژن‌های مرتبط با پروتئین‌های شوک حرارتی (HSP) باعث افزایش طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گوجه‌فرنگی شد (٤۰). در بذرهای سویا نیز افزایش سطح رونوشت ژن‌های پروتئین‌های شوک حرارتی (HSP) و پروتئین‌های شوک حرارتی کوچک (HSPs) با طول عمر بذر همبستگی داشت (٤۲). توانایی زنده‌ماندن در طول ذخیره‌سازی با DNA و سامانه‌های ترمیم پروتئین نیز مرتبط است که با حضور مشخص پروتئین‌هایی مانند لیگازهای DNA (٤۳) و پروتئین ال-ایزواسپارتیل متیل‌ترانسفراز (PIMT) (٤٤) نشان داده می‌شود. مشاهده شد که بیان بیش‌ازحد OsHSP18.2، یک HSP سیتوزولی

کلاس II، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را کاهش می‌دهد و امکان افزایش سرعت جوانه‌زنی را پس از زوال کنترل‌شده در بذر آرابیدوپسیس پس از شوک حرارتی فراهم می‌کند (٤٤) که نشان‌دهنده سم‌زدایی ROS در طول ذخیره‌سازی است.

اثر هر یک از عوامل آزمایشی شامل پیش‌آماده‌سازی، زوال، تنش اسمزی (به‌جز درصد جوانه‌زنی و درصد گیاهچه طبیعی)، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه نیز معنی‌دار بود (جدول ۲). پیش‌آماده‌سازی + تنش اسمزی در تمام سطوح زوال باعث کاهش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، درصد گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲). میزان کاهش هر یک از صفات ذکرشده با افزایش طول دوره زوال در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده بیش‌تر از بذرهای شاهد بود. در تیمار دو روز زوال بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی (٦٩/٣٣ درصد)، سرعت جوانه‌زنی (٠/٠٤٠ بر ساعت) و درصد گیاهچه طبیعی (٥٨/٦٦ درصد) در تیمار شاهد (بدون پیش‌آماده‌سازی) مشاهده شد و میزان هر سه صفت مذکور در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده تحت تنش اسمزی به‌شدت کاهش یافت.

جدول ۲- تجزیه واریانس برای درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، گیاهچه طبیعی، طول و وزن خشک گیاهچه گلرنگ تحت‌تأثیر پیش‌آماده‌سازی، زوال و تنش اسمزی.

Table 2. Analysis of variance for germination percentage, germination rate, normal seedling, length and dry weight of safflower seedling under the priming, deterioration and osmotic stress.

وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	طول گیاهچه Seedling length	گیاهچه طبیعی Normal seedling	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V
109**	87**	3871**	0.0034**	9154**	3	زوال Deterioration
15**	19**	8624**	0.001**	8028**	2	پیش‌آماده‌سازی priming
0.45**	0.62*	0.88ns	0.0000005**	8^{ns}	1	تنش اسمزی Osmotic stress
8.10**	5.84**	1330**	0.00013**	1379**	6	زوال × پیش‌آماده‌سازی D × P
12**	6.54**	19**	0.000033**	8.59*	3	زوال × تنش اسمزی D × O
0.66**	0.54**	150**	0.0001**	98**	2	پیش‌آماده‌سازی × تنش اسمزی P × O
9**	12**	77**	0.00016**	87**	6	زوال × پیش‌آماده‌سازی × تنش اسمزی D × P× O
0.05	0.1	0.94	0.0000005	2.19	48	خطای آزمایش Error
7.31	10.68	5.46	5.32	5.72		ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

^{ns}، * و ** به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد

^{ns}, * and ** indicate non-significance and significance at 5 and 1 % probability levels, respectively

به‌علاوه، در سطح دو روز زوال بذرهای تحت پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو) از درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، درصد گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه بالاتری در مقایسه با بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با اسید سالیسیلیک برخوردار بود. (شکل ۲). در تمامی بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده درصد جوانه‌زنی در تیمار چهار روز زوال نزدیک به صفر بود، اما بذرهای شاهد دارای ۳٤/٦٦ درصد جوانه‌زنی بودند. در تیمار شش روز زوال درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، درصد گیاهچه طبیعی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه تمامی بذرهای شاهد و پیش‌آماده‌سازی شده برابر صفر بود. هم‌چنین در تیمار بدون زوال، بالاترین درصد جوانه‌زنی (٦۹/۳۳ درصد)، بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۰٤۰ بر ساعت) و بالاترین درصد گیاهچه طبیعی (۵۸/٦٦ درصد) در بذرهای شاهد مشاهده شد (شکل ۲).

جدول ۳- تجزیه واریانس برای درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، گیاهچه طبیعی، طول و وزن خشک گیاهچه گلرنگ رقم سینا تحت‌تأثیر پیش‌آماده‌سازی، زوال و روش خشک‌کردن بذر.

Table 3. Analysis of variance for germination percentage, germination rate, normal seedling, length and dry weight of safflower seedling under the influence of priming, controlled deterioration and seed drying method.

وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	طول گیاهچه Seedling length	گیاهچه طبیعی Normal seedling	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V
206**	232**	19122**	0.0078**	24445**	3	زوال Deterioration
15**	33**	38^{ns}	0.00048**	28^{ns}	2	پیش‌آماده‌سازی Priming
0.67^{ns}	3.73**	80^{ns}	0.00023**	410**	1	خشک‌کردن Drying method
3.42**	7.02**	62*	0.00017**	69*	6	زوال × پیش‌آماده‌سازی D × P
0.21^{ns}	0.63**	10.29^{ns}	0.000082**	54	3	زوال × خشک‌کردن D × DM
0.17^{ns}	1.06**	40^{ns}	0.0002**	122*	2	پیش‌آماده‌سازی × خشک‌کردن P × DM
0.88*	1.38**	13^{ns}	0.0001**	85*	6	زوال × پیش‌آماده‌سازی × خشک‌کردن D × P× DM
0.33	0.12	24	0.0000007	28	48	خطای آزمایش Error
11.47	6.66	12.07	3.44	11.14		ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

^{ns}، * و ** به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد

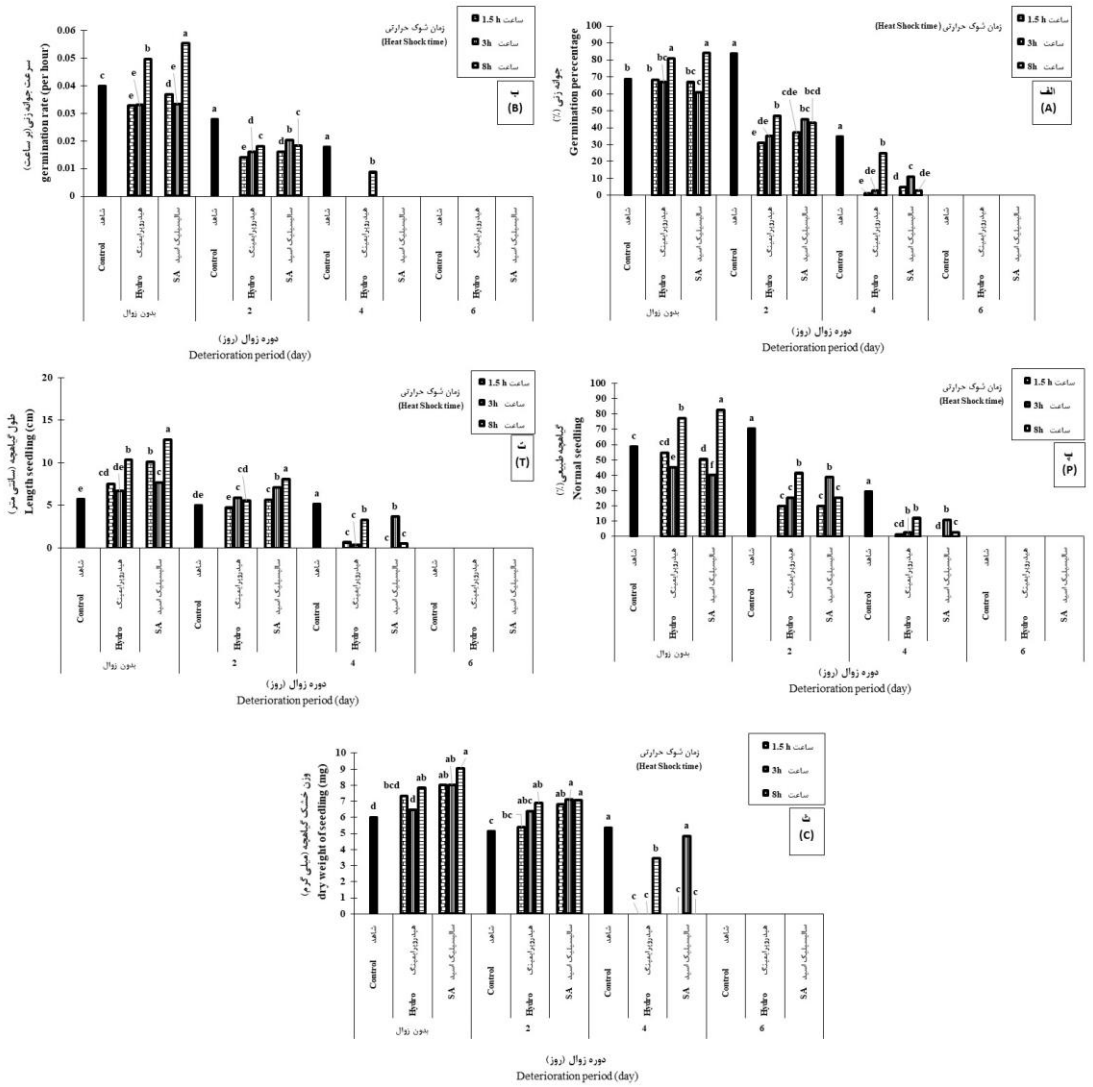
^{ns}, * and ** indicate non-significance and significance at 5 and 1 % probability levels, respectively

اعمال تنش اسمزی ۱/۵- و ۲/۵- مگاپاسکال پس از پیش‌آماده‌سازی باعث کاهش قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در مقایسه با بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی در هر دو شرایط با و بدون زوال شد (شکل ۲). هرچند که بروگینک و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که اعمال تنش اسمزی بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی باعث افزایش طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گل حنا می‌شود (۲۱)، اما ملک و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که در کلزا اعمال تنش اسمزی طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده را نسبت به شاهد کاهش داد (۲۸). در مطالعه حاضر نیز اعمال تنش اسمزی منجر به افزایش طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده نسبت به شاهد نشد.

نتایج تجزیه واریانس روش‌های خشک‌کردن بذر پس از پیش‌آماده‌سازی در طی زوال در جدول ۳ ارائه‌شده است. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده زوال بر تمامی صفات موردبررسی معنی‌دار بود. اثر ساده پیش‌آماده‌سازی تنها بر سرعت جوانه‌زنی، طول و وزن خشک گیاهچه معنی‌دار بود. اثر ساده روش خشک‌کردن بذر بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و طول گیاهچه معنی‌دار بود. اثر متقابل دوگانه زوال × پیش‌آماده‌سازی بر تمامی صفات، اثر متقابل زوال × روش خشک‌کردن بر سرعت جوانه‌زنی و طول گیاهچه، اثر متقابل پیش‌آماده‌سازی × روش خشک‌کردن بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و طول گیاهچه و اثر متقابل زوال × پیش‌آماده‌سازی × روش خشک‌کردن بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول گیاهچه و وزن خشک گیاهچه معنی‌دار بود (جدول ۳). در سطح زوال صفر، بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده + روش خشک‌کردن آرام باعث افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها به‌ترتیب ۱۸ و ۱۲ درصد در مقایسه با بذرهای شاهد شد. در تیمار ۲ روز زوال، به‌ترتیب در روش پیش‌آماده‌سازی (آب مقطر (هیدرو) و ۵۰ پی‌پی‌ام)، روش خشک‌کردن آرام ۸٤ و ۸۰ درصد جوانه‌زنی در مقایسه با روش خشک‌کردن سریع ۷۸/٦٦ و ۷۲ درصد مشاهده شد. هم‌چنین، در سطح ٤ روز زوال، پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو) + روش خشک‌کردن آرام (۵۲ درصد) و پیش‌آماده‌سازی با ۵۰ پی‌پی‌ام اسید سالیسیلیک + روش خشک‌کردن آرام (٤۰ درصد) و یا سریع (٤۱/۳۳ درصد) باعث افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها در مقایسه با شاهد (۳٤/٦٦ درصد) شدند (شکل ۳- الف). بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده + روش خشک‌کردن آرام و سریع باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی بذرهای رقم سینا در مقایسه با بذرهای شاهد در سطح زوال صفر روز شد. در تیمار ۲ روز زوال، روش خشک‌کردن آرام و سریع در هر دو روش پیش‌آماده‌سازی باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی شد. هم‌چنین بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با هورمون در سطح زوال ۲ روز دارای بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی بود. هم‌چنین، تیمارهای پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو) + روش خشک‌کردن آرام و یا سریع و پیش‌آماده‌سازی با هورمون + روش خشک‌کردن آرام و یا سریع باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی بذرها در مقایسه با شاهد در سطح ٤ روز زوال شدند (شکل ۳- ب). در تیمار صفر روز زوال، درصد گیاهچه طبیعی در هر دو روش پیش‌آماده‌سازی و هر دو روش خشک‌کردن بالاتر از بذرهای شاهد بود (شکل ۳- پ). در تیمارهای ۲ و ٤ روز زوال اختلاف قابل‌توجهی بین بذرهای شاهد و بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده تحت روش‌های مختلف خشک‌کردن ازلحاظ درصد گیاهچه طبیعی مشاهده نشد به‌جز روش خشک‌کردن آرام درروش پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو) در سطح ٤ روز زوال که از درصد گیاهچه طبیعی بالاتری

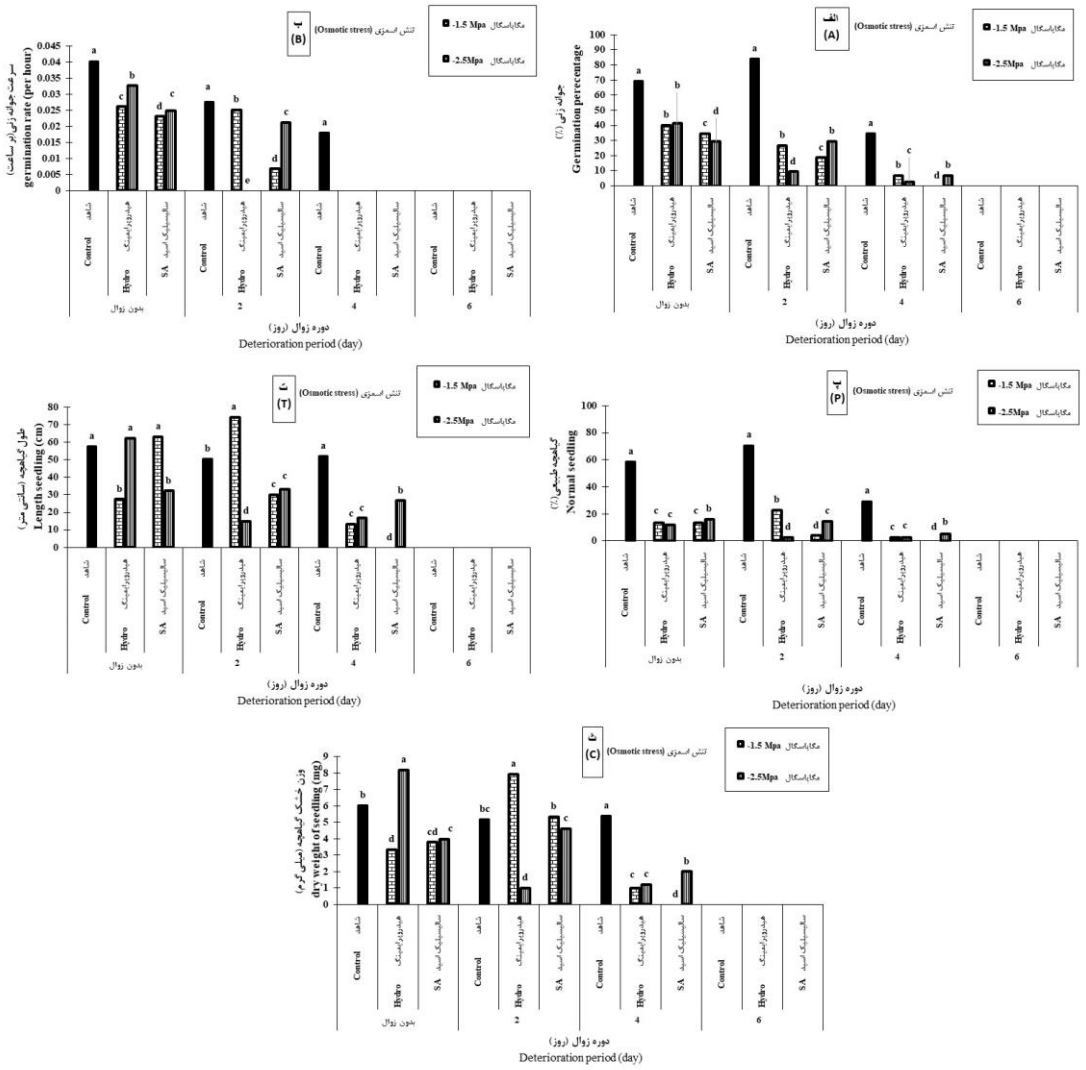
در مقایسه با سایر تیمارها برخوردار بود (شکل ۳، پ). از طرفی، طول و وزن خشک گیاهچه در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در سطوح مختلف زوال صرف‌نظر از روش خشک‌کردن بالاتر از بذرهای شاهد بود (شکل ۳، ت و ث). در پیش‌آماده‌سازی بذرها با آب مقطر (هیدرو) و هورمون و در سطوح مختلف زوال، بذرهای تحت روش خشک‌کردن سریع از طول گیاهچه بالاتری در مقایسه با بذرهای تحت روش خشک‌کردن آرام برخوردار بودند (شکل ۳، ت). ازلحاظ وزن خشک گیاهچه، در سطح ٤ روز زوال، پیش‌آماده‌سازی با آب مقطر (هیدرو)، روش خشک‌کردن سریع از وزن خشک بالاتری در مقایسه با روش خشک‌کردن آرام برخوردار بود و در سایر تیمارها اختلافی بین روش‌های خشک‌کردن ازلحاظ وزن خشک گیاهچه وجود نداشت (شکل ۳، ث).

درمجموع، عدم استفاده از شوک حرارتی و تنش اسمزی پس از پیش‌آماده‌سازی در بذرهای گلرنگ به نتایج مطلوب‌تری منتهی شد، زیرا قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ که بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی تنها در معرض روش‌های خشک شدن قرار گرفتند، بیشتر از بذرهایی بود که قبل از خشک شدن در معرض شوک حرارتی و یا تنش اسمزی قرار گرفتند. هر دو روش خشک‌کردن باعث بهبود قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ شدند، به‌طوری‌که قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده یا بیش‌تر از بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی بود و یا اختلاف معنی‌داری با آن نداشت. ازاین‌رو، تنها در شرایط اعمال روش‌های خشک‌کردن پس از پیش‌آماده‌سازی، قابلیت ماندگاری بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ در هنگام ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد. با توجه به کاهش تحمل به پسابیدگی پس از پیش‌آماده‌سازی، روش خشک‌کردن می‌تواند نقش مهمی در تعیین کیفیت و طول عمر بذرها در طی ذخیره‌سازی داشته باشد (٤٥). روش‌های مختلف خشک‌کردن بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده می‌توانند باعث بروز الگوهای متفاوتی از بیان ژن شوند و درنتیجه کیفیت و طول عمر بذرها در روش‌های مختلف خشک‌کردن متفاوت باشد (۳۳). به‌طورکلی، خشک‌کردن به روش آرام به‌منزله ادامه فرآیند جوانه‌زنی به‌مدت طولانی‌تر می‌باشد و پیشرفت بیش‌ازحد سوخت‌وساز جوانه‌زنی در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده با کاهش تحمل به پسابیدگی، تخریب ساختارهای غشا به‌ویژه در محور جنین و افزایش نشت الکترولیت‌ها همراه است (۲۸). ازاین‌رو، روش خشک‌کردن سریع منجر به حفظ ساختار غشاها می‌شود و می‌تواند به افزایش طول عمر بذر کمک کند (٤٦ و ۳۲). افزایش تجمع اتانول درروش خشک‌کردن آرام از اثرات منفی دیگر در این روش به شمار می‌رود (٤٧). بااین‌وجود، این یافته‌ها ممکن است در تمامی شرایط صادق نباشند، زیرا در برخی مطالعات استفاده از روش خشک‌کردن آرام باعث دست‌یابی به نتایج مطلوب‌تری شد (۲۳).



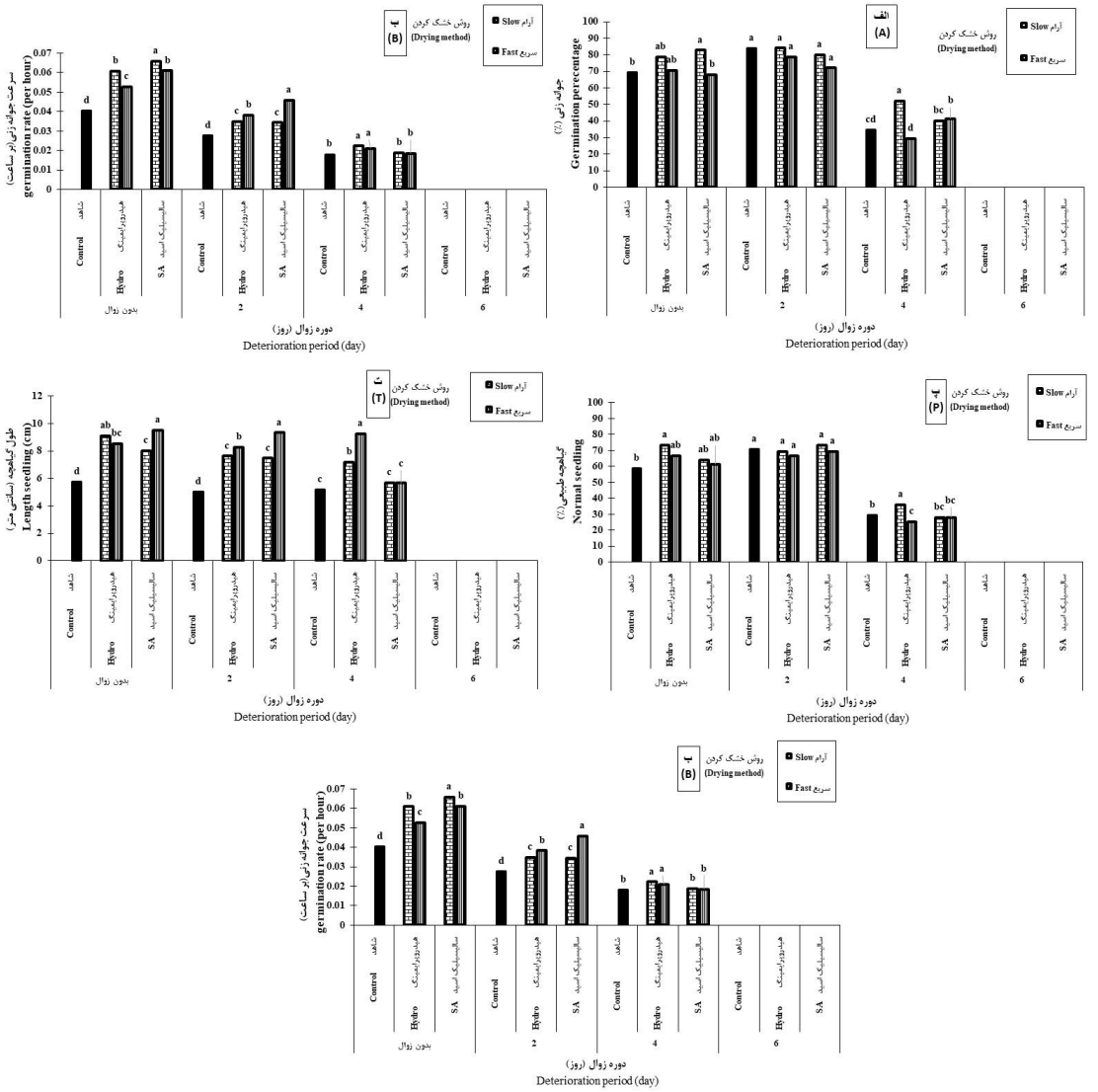
شکل ۱- درصد جوانه‌زنی (الف)، سرعت جوانه‌زنی (ب)، درصد گیاهچه طبیعی (پ)، طول گیاهچه (ت) و وزن خشک گیاهچه (ث) بذرهای گلرنگ تحت‌تأثیر تیمارهای پیش‌آماده‌سازی، شوک حرارتی و زوال کنترل‌شده.

Fig. 1. Germination percentage (A), germination rate (B), normal seedling percentage (P), seedling length (T) and seedling dry weight (C) of safflower seeds under the priming treatments, heat shock and controlled deterioration.



شکل ۲- درصد جوانه‌زنی (الف)، سرعت جوانه‌زنی (ب)، درصد گیاهچه طبیعی (پ)، طول گیاهچه (ت) و وزن خشک گیاهچه (ث) بذرهای گلرنگ رقم سینا تحت‌تأثیر تیمارهای پیش‌آماده‌سازی، تنش اسمزی و زوال کنترل‌شده.

Fig. 2. Germination percentage (A), germination rate (B), normal seedling percentage (P), seedling length (T) and seedling dry weight (C) of safflower seeds under the priming treatments, osmotic stress and controlled deterioration.



شکل ۳- درصد جوانه‌زنی (الف)، سرعت جوانه‌زنی (ب)، درصد گیاهچه طبیعی (پ)، طول گیاهچه (ت) و وزن خشک گیاهچه (ث) بذرهای گلرنگ رقم سینا تحت‌تأثیر تیمارهای پیش‌آماده‌سازی، روش خشک‌کردن و زوال کنترل‌شده.

Fig. 3. Germination percentage (A), germination rate (B), normal seedling percentage (P), seedling length (T) and seedling dry weight (C) of safflower seeds under the priming treatments, drying method and controlled deterioration.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پیش‌آماده‌سازی بذر بسته به شرایط، نه‌تنها کیفیت بذرها را طی دوره ذخیره‌سازی کاهش نمی‌دهد بلکه با انتخاب تیمارهای مناسب، قابل‌افزایش نیز می‌باشد. در این پژوهش، کاربرد تیمارهای شوک حرارتی و نیز تنش اسمزی بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی و قبل از خشک‌کردن بذرها منجر به کاهش قابلیت جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده گلرنگ در مقایسه با بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی در شرایط زوال مصنوعی شد. این در حالی بود که زمانی که بذرها پس از پیش‌آماده‌سازی بلافاصله به‌وسیله یکی از روش‌های آرام و یا سریع خشک شدند و هیچ تیمار اضافه‌ای به‌کار نرفت، قابلیت جوانه‌زنی و رشد

گیاهچه در بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده نسبت به بذرهای بدون پیش‌آماده‌سازی در سطوح مختلف زوال افزایش هم داشت. به‌طور خلاصه، خشک‌کردن بذر با روش مناسب بلافاصله پس از پیش‌آماده‌سازی می‌تواند منجر به افزایش طول عمر بذرهای پیش‌آماده‌سازی شده در طی دوره ذخیره‌سازی شود.

منابع

1. Maghsoudi, E., Yadavi, A., Balouchi, H., Dehnavi, M. M., Piri, R., & Mastinu, A. (2024). Improving the physiological properties and yield of safflower by combining organic and chemical nitrogen in different irrigation cut-off conditions. *Industrial Crops and Products*, 222, 1-13.
2. Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Rebezov, M., Nile, A., Sun, M., Venkidasamy, B., Xiao, J., & Kai, G. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture-recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 1-31.
3. Thakur, M., Tiwari, S., Kataria, S., & Anand, A. (2022). Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*, 305, p.111355.
4. Fallah, S., Malekzadeh, S., & Pessarakli, M. (2018). Seed priming improves seedling emergence and reduces oxidative stress in *Nigella sativa* under soil moisture stress. *Journal of Plant Nutrition*, 41(1), 29-40.
5. Silva, B. N. P., Masetto, T. E., & Rocha, L. G. (2024). An insight into seed priming response of *Crotalaria ochroleuca* and *Crotalaria spectabilis* during storage. *Brazilian Journal of Biology*, 84, p.e279806.
6. Tu, K., Cheng, Y., Pan, T., Wang, J., & Sun, Q. (2022). Effects of seed priming on vitality and preservation of pepper seeds. *Agriculture*, 12(5), p.603.
7. Pagano, A., Macovei, A., & Balestrazzi, A. (2023). Molecular dynamics of seed priming at the crossroads between basic and applied research. *Plant Cell Reports*, 42(4), 657-688.
8. Ren, M., Tan, B., Xu, J., Yang, Z., Zheng, H., Tang, Q., Zhang, X., & Wang, W. (2023). Priming methods affected deterioration speed of primed rice seeds by regulating reactive oxygen species accumulation, seed respiration and starch degradation. *Frontiers in Plant Science*, 14, p.1267103.
9. Sano, N., & Seo, M. (2019). Cell cycle inhibitors improve seed storability after priming treatments. *Journal of Plant Research*, 132, 263-271.
10. Sibande, G. A. K., Kabambe, V. H., Maliro, M. F. A., & Karoshi, V. (2015). Effect of priming techniques and seed storage period on soybean (*Glycine max* L.) germination. *Journal of Dynamics in Agricultural Research*, 2(5), 46-53.
11. Batista, T. B., Fernandez, G. J., Da Silva, T. A., Maia, J., & Da Silva, E. A. A. (2020). Transcriptome analysis in osmo-primed tomato seeds with enhanced longevity by heat shock treatment. *AoB Plants*, 12 (5) [online].
12. Piri, R., Moradi, A., & Hosseini-Moghaddam, M. (2018). Effect of accelerated aging and seed priming on germination and some biochemical indices of cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 5(1), 69-81.
13. Singh, N., Bhuker, A., Pandey, V., Punia, H., Sourabh, Singh, B., Ahmad, A., Tyagi, A., & Malik, A. (2024). Nano-enhanced storage of American cotton using metal-oxide nanoparticles for improving seed quality traits. *Scientific Reports*, 14(1), 24445.
14. Bore, E. K., Ishikawa, E., Libron, J. A. M. A., Goto, K., Odama, E., Nakao, Y., Yabuta, S., & Sakagami, J. I. (2023). Primed seeds of NERICA 4 stored for

long periods under high temperature and humidity conditions maintain germination rates. *Applied Sciences*, 13(5), 2869.

15. Bora, P. P., Barua, M., Deka, S.D., Das, P., & Barua, P. K. (2023). Influence of seed storage and priming on naturally aged seeds of aromatic Joha Rice. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 372-383.
16. Ali, N., Rab, A., & Shah, Z. (2013). Role of pre storage seed priming in controlling seed deterioration during storage. *Sarhad Journal of Agriculture*, 29(3), 379-386.
17. Rasoolzadeh, L., Salehi Shanjani, P., & Jafari, A. A. (2020). Effects of seed priming on germination characteristics of Achillea millefolium seeds under different ageing treatment. *Journal of Medicinal plants and By-product*, 9(1), 79-89.
18. Kaya, M. D., Ergin, N., Harmancı, P., & Kulan, E. G. (2024). Seed priming as a method of preservation and restoration of sunflower seeds. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 31 (4), 1-7.
19. Jovicic, D., Ovuka, J., Nikolic, Z., Petrovic, G., Marinkovic, D., Stojanovic, M., & Tamindzic, G. (2022). Potential of two hydration treatments for improvement of sunflower seed vigor. *Seed Science and Technology*, 50(3), 357-366.
20. Panghal, V. P. S., Bhuker, A., Duhan, D. S., & Kumar, A. (2023). Maintaining onion seed quality during storage through seed priming. *Agricultural Reviews*, 44(2), 269-272.
21. Bruggink, G. T., Ooms, J., & Van der Toorn, P. (1999). Induction of longevity in primed seeds. *Seed Science Research*, 9(1), 49-53.
22. Adetunji, A. E., Adetunji, T. L., Varghese, B., Sershen, & Pammenter, N. W. (2021). Oxidative stress, ageing and methods of seed invigoration: an overview and perspectives. *Agronomy*, 11(12), p.2369.
23. Schwember, A. R., & Bradford, K. J. (2005). Drying rates following priming affect temperature sensitivity of germination and longevity of lettuce seeds. *HortScience*, 40(3), 778-781.
24. Fabrissin, I., Sano, N., Seo, M., & North, H. M. (2021). Ageing beautifully: can the benefits of seed priming be separated from a reduced lifespan trade-off?. *Journal of Experimental Botany*, 72(7), 2312-2333.
25. Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223.
26. Gurusinghe, S., Powell, A. L., & Bradford, K. J. (2002). Enhanced expression of BiP is associated with treatments that extend storage longevity of primed tomato seeds. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(4), 528-534.
27. Ansari, O., Sharifzadeh, F., Moradi, A., Azadi, M. S., & Younesi, E. (2013). Heat shock treatment can improve some seed germination indexes and enzyme activity in primed seeds with gibberellin of mountain rye (*Secale montanum*) under accelerated aging conditions. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 4, 156.
28. Malek, M., Ghaderifar, F. Torabi, B., & Sadeghipour, H. R. (2019). Rapeseed seed viability reaction to priming treatments and drying conditions of primed seeds. *Journal of Agronomy*, *22*(1), 27-4. [In Persian with English Summary]
29. Ventura, L., Dona, M., Macovei, A., Carbonera, D., Buttafava, A., Mondoni, A., Rossi, G., & Balestrazzi, A. (2012). Understanding the molecular pathways associated with seed vigor. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 196-206.
30. Ratikanta, K. M. (2011). Seed priming: an efficient farmers' technology to improve seedling vigour, seedling establishment and crop productivity. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 2, 297.

31.Ghaderifar, F., & Gorzin, M. (2018). Applied researches in seed technology. *Publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 240 p.
32.Demir, I., Ermis, S., & Okcu, G. (2005). Effect of dehydration temperature and relative humidity after priming on quality of pepper seeds. *Seed Science and Technology*, 33(3), 563-569.
33.Soeda, Y., Konings, M. C., Vorst, O., Van Houwelingen, A. M., Stoopen, G. M., Maliepaard, C. A., Kodde, J., Bino, R. J., Groot, S. P., & Van Der Geest, A. H. (2005). Gene expression programs during *Brassica oleracea* seed maturation, osmopriming, and germination are indicators of progression of the germination process and the stress tolerance level. *Plant Physiology*, 137(1), 354-368.
34.Coolbear, P., Toledo, P., & Seetagoses, U. (1992). Effects of temperature of pre-sowing hydration treatment and subsequent drying rates on the germination performance of celery seed. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(1), 9-14.
35.Bujalski, W., & Nienow, A. (1991). Large-scale osmotic priming of onion seeds: a comparison of different strategies for oxygenation. *Scientia Horticulturae*, 46(2), 13-24.
36.ISTA. (2009). International Rules for Seed Testing. *International Seed Testing Association*, Bassersdorf, Switzerland, pp: 48.
37.Ghaderi-Far, F., Alimagham, S. M., Kameli, A. M., & Jamali, M. (2012). Isabgol (*Plantago ovata* Forsk) seed germination and emergence as affected by environmental factors and planting depth. *International Journal of Plant Production*, 6, 185-194.
38.Li, W., Niu, Y., Zheng, Y., & Wang, Z. (2022). Advances in the understanding of reactive oxygen species-dependent regulation on seed dormancy, germination, and deterioration in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 826809.
39.Kumar, A., Nayak, A. K., Hanjagi, P. S., Kumari, K., Vijayakumar, S., Mohanty, S., Tripathi, R., & Panneerselvam, P. (2021). Submergence stress in rice: Adaptive mechanisms, coping strategies and future research needs. *Environmental and Experimental Botany*, 186, p.104448.
40.Hussain, S., Zheng, M., Khan, F., Khaliq, A., Fahad, S., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2015). Benefits of rice seed priming are offset permanently by prolonged storage and the storage conditions. *Scientific Reports*, 5(1), 8101.
41.Lima, J. J. P., Buitink, J., Lalanne, D., Rossi, R. F., Pelletier, S., da Silva, E. A. A., & Leprince, O. (2017). Molecular characterization of the acquisition of longevity during seed maturation in soybean. *Plos One*, 12(7), 1-25.
42.Waterworth, W. M., Masnavi, G., Bhardwaj, R. M., Jiang, Q., Bray, C. M., & West, C. E. (2010). A plant DNA ligase is an important determinant of seed longevity. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*, 63(5), 848-860.
43.Oge, L., Bourdais, G., Bove, J., Collet, B., Godin, B., Granier, F., Boutin, J. P., Job, D., Jullien, M., & Grappin, P. (2008). Protein repair L-isoaspartyl methyltransferase1 is involved in both seed longevity and germination vigor in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 20(11), 3022-3037.
44.Kaur, H., Petla, B. P., & Majee, M. (2016). Small heat shock proteins: roles in development, desiccation tolerance and seed longevity. In: Asea AAA, Calderwood S.; Kaur, P, eds. Heat shock proteins and plants. *New York: Springer*, 3-18.
45.Wang, W., He, A., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2018). The effect of storage condition and duration on the deterioration of primed rice seeds. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1-17.

46.Bewley, J. D., Bradford, K., & Hilhorst, H. (2013). Seeds: physiology of development, germination and dormancy. *Springer Science and Business Media*. 392 pp.

47.Kittiwatchana, W., Imsabai, W., Chanprame, S., & Thongket, T. (2021). Effects of drying rates on quality of Thai hot-chili (*Capsicum annuum* L.) seed after priming. *Agriculture and Natural Resources*, 55(5), 863-872.