Iranian Journal of Seed Research, 2024, 10(2): 49-65

Research Article

The effect of sodium nitroprusside levels on germination indices and antioxidant enzyme activity in soybean (*Glycine max*) seedlings under accelerated aging test

Haniyeh Saadat[1,*], Mohammad Sedghi[2]

Extended abstract

Introduction: Soybean is among the most important oil crops of the world. Currently, 55% of the world's oil is supplied by soybean. Seed aging, an undesirable feature of agriculture, is one of the main problems in agriculture that leads to economic losses. Although aging is an irreversible process, its speed is delayed by proper storage and optimal storage methods. While kept under inappropriate conditions after harvesting, its quality during storage declines. Priming has a direct and indirect effect on the growth and development of plants, and its indirect effects are more beneficial than its direct effects. Priming improves the longevity of low-vigor seeds. During the priming of these seeds, a long time can occur to repair metabolic damage before any progress in germination, which ultimately prevents further deterioration. Several studies have shown that seed treatment with sodium nitroprusside during reaction with reactive oxygen species and increased activity of antioxidant enzymes is essential to protecting plants against stress. The aim of this study was to the investigate the effect of sodium nitroprusside levels on germination indices and antioxidant enzyme activity in soybean seedlings under accelerated aging test.

Materials and Methods: This experiment was conducted in 2023 as a factorial in the form of a completely randomized design with 3 replications at the University of Mohaghegh Ardabili. Experimental treatments included accelerated aging treatment at three levels (0, 24, and 48 hours) and three levels of sodium nitroprusside (0, 100, and 200 ppm).

Results: The results showed that aging reduced germination indices including germination percentage (GP), germination value (GV), and mean daily germination (MDG). Also, priming with different levels of sodium nitroprusside, especially the 200 ppm level, improved these traits, but priming with sodium nitroprusside decreased the mean germination rate (MGR) and the mean germination time (MGT). The superoxide dismutase and ascorbate peroxidase enzyme activity due to priming with sodium nitroprusside 200 ppm compared to the control showed an increase of 22 and 26%, respectively. Also, the content of peroxidase enzyme activity showed an increase of about 34% compared to the control in priming with sodium nitroprusside 200 ppm and 48 hours aging compared to the control. The lowest catalase enzyme (7.7 units mg protein^{-1} min^{-1}) was in pretreatment with sodium nitroprusside 100 ppm and without aging.

Conclusions: The results of this study show that among the different treatments, pre-treatment of seeds with sodium nitroprusside 200 ppm may be considered an effective way to improve germination indices and antioxidant enzymes activity of soybean and can be used as a treatment to deal with salinity conditions in soybean seedlings and improve their growth.

Keywords: Aging, Biochemical traits, Growth Indices, Priming, Sodium Nitroprusside

Highlights:

1- Seed priming using sodium nitroprusside improved germination indices of seed common soybean under aging.
2- Priming with sodium nitroprusside increased antioxidant enzyme activity.
3- The concentration of 200 ppm sodium nitroprusside showed a better effect on germination indices and biochemical characteristics.

[1] Ph.D. student of Ecology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardabili, Iran.
[2] Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardabili, Iran.

*Corresponding author, E-mail: t.saadat2020@gmail.com

Received: 16.5.2023; Revised: 12.9.2023;
Accepted: 26.9.2023; Online Published: 21.2.2024

DOR:

DOI: 10.61186/yujs.10.2.49

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

پژوهش‌های بذر ایران/ سال دهم/ شماره دوم/ ۱۴۰۲/ صفحات: ۶۵-۴۹

مقاله پژوهشی

تأثیر سطوح سدیم نیترو پروساید بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در گیاهچه سویا (*Glycine max*) تحت آزمون پیری تسریع شده

هانیه سعادت[۱*]، محمد صدقی[۲]

چکیده مبسوط

مقدمه: سویا یکی از مهمترین گیاهان روغنی در جهان است. در حال حاضر ۵۵ درصد روغن دنیا توسط سویا تأمین می‌شود. فرسودگی بذر یکی از مشکلات اصلی در کشاورزی و یک صفت نامطلوب است که زیان‌های اقتصادی به دنبال دارد. فرسودگی یک فرآیند غیر قابل برگشت است، ولی سرعت آن به‌وسیله‌ی روش‌های مناسب انبارداری و نگهداری مطلوب به تأخیر می‌افتد و نگهداری آن در شرایط نامناسب پس از برداشت، کیفیت آن را در طول انبارداری کاهش می‌دهد. پرایمینگ بذر اثر مستقیم و غیر مستقیم بر رشد و نمو گیاهان دارد که سودمندی اثرات غیر مستقیم آن بیش‌تر از اثرات مستقیم آن می‌باشد. پرایمینگ موجب بهبود طول عمر بذرهای با بنیه پایین می‌شود. در طول پرایمینگ این بذرها، زمان زیادی برای ترمیم خسارات متابولیکی، قبل از هرگونه پیشرفت در جوانه‌زنی، اتفاق می‌افتد که در نهایت مانع فرسودگی بیش‌تر می‌شود. مطالعات متعددی نشان داده است که تیمار بذر با سدیم نیترو پروساید طی واکنش با گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت نقش مهمی در حفاظت گیاهان در مقابل تنش دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سطوح سدیم نیترو پروساید بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گیاهچه سویا تحت آزمون پیری تسریع شده اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: آزمایش در سال ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با ۳ تکرار در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. عامل‌های آزمایشی شامل پیری تسریع شده در سه سطح (صفر، ۲۴ و ۴۸ ساعت) و سه سطح سدیم نیترو پروساید (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که فرسودگی شاخص‌های جوانه‌زنی شامل درصد جوانه‌زنی، ارزش جوانه‌زنی و میانگین جوانه‌زنی روزانه را کاهش داد. همچنین پرایمینگ با سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید به‌خصوص سطح ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر این صفات را بهبود بخشید، ولی پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید سرعت جوانه‌زنی روزانه و میانگین مدت جوانه‌زنی را کاهش داد. میزان فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز به ترتیب ۲۲ و ۲۶ درصد در پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به شاهد افزایش نشان دادند. همچنین، میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و فرسودگی ۴۸ ساعت نسبت به شاهد در حدود ۳۴ درصد افزایش نشان داد. کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۷/۷ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و بدون فرسودگی بود.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد تیمار بذر با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مؤثرترین روش برای بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر سویا محسوب می‌شود و با بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت می‌تواند اثرات مضر فرسودگی بر برخی صفات در گیاهچه سویا را کاهش داده و رشد گیاهچه را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: پرایمینگ، سدیم نیترو پروساید، فرسودگی، شاخص‌های جوانه‌زنی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت

جنبه‌های نوآوری:

۱- پرایمینگ بذر با سدیم نیترو پروساید سبب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر سویا تحت فرسودگی گردید.

۲- پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را افزایش داد.

۳- غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سدیم نیترو پروساید تأثیر بهتری بر شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی نشان داد.

[۱] دانشجوی دکتری اکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۲] استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی ، اردبیل، ایران.

[*] رایانامه نویسنده مسئول: t.saadat2020@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۶؛ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۴؛ تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۲

DOR:

DOI: 10.61186/yujs.10.2.49

شاپا: ۱۴۸۰-۲۳۸۳ (برخط)؛ ۱۲۵۱-۲۳۸۳ (چاپی)

مقدمه

سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) یکی از مهم‌ترین محصولات اقتصادی است که در سرتاسر جهان بطور عمده برای تأمین روغن نباتی و خوراکی، پروتئین برای انسان و همچنین دام کشت می‌شود (هارتمن[1] و همکاران، ۲۰۱۱). جوانه‌زنی سویا و عملکرد کلی آن به شدت تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد (کاتاریا و ورما[2]، ۲۰۱۸؛ جابین[3] و همکاران، ۲۰۲۱). از این رو، بررسی پتانسیل روش‌های تقویت بذر در کاهش خطر مربوط به دستیابی به جمعیت گیاهی مناسب در محیط تحت فرسودگی ضروری است. فرسودگی بذر حتی در شرایط محیطی بهینه نیز رخ می‌دهد و مشکل بزرگی را بر سر راه کشاورزان و حفظ ذخایر ژرم‌پلاسم می‌گذارد (لی[4] و همکاران، ۲۰۱۷). تولید رادیکال‌های آزاد طی فرسودگی موجب تغییرات کروموزومی در سلول‌های ریشه‌چه، تخریب DNA در جنین بذرهای خشک و آبنوشی شده و تخریب غشای سلولی ناشی از پراکسیداسیون خودبخودی می‌شود (دانتاس[5] و همکاران، ۲۰۱۹؛ چاندل[6] و همکاران، ۲۰۱۵). هر چه قدر مواد اکسیدشونده نظیر روغن در بذرها زیاد باشد، بیشتر تحت تأثیر فرسودگی قرار می‌گیرند، در نتیجه بذرهای روغنی مانند سویا حساسیت بیش‌تری دارند (ونگ[7] و همکاران، ۲۰۲۱). طی فرسودگی درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۹). پژوهشی دیگر نشان داد که فعالیت آنزیم‌ها به‌ویژه سوپراکسیددیسموتاز طی فرسودگی در سویا کاهش یافت (ژن[8] و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات نشان داده است که فرسودگی باعث کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز شد، اما فعالیت آنزیم پراکسیداز ۶۰ درصد افزایش یافت (حاجی محمودی[9] و همکاران، ۲۰۲۱).

پرایمینگ بذر روشی برای تحریک فرآیندهای متابولیک بذر در طول جوانه‌زنی و بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط محیطی مختلف است (تاکار[10] و همکاران، ۲۰۱۹؛ پراجاپاتی[11] و همکاران، ۲۰۲۰). فناوری پرایمینگ بذر یک فرآیند فیزیولوژیک و بیوشیمیایی کم هزینه و مفید است که موجب تحریک جوانه‌زنی بذر، افزایش صفت‌های مورفولوژیکی و بهبود رشد و نمو گیاهچه تحت تنش غیر زیستی، که فرسودگی هم جزء آن می‌باشد، می‌شود (رحمان[12] و همکاران، ۲۰۲۰؛ تانیا[13] و همکاران، ۲۰۲۰). پرایمینگ درصد و سرعت جوانه‌زنی را افزایش داده و موجب بهبود جوانه‌زنی و افزایش بنیه و رشد گیاهچه در شرایط نامساعد محیطی می‌شود (انوار[14] و همکاران، ۲۰۲۱). سدیم نیترو پروساید یک تنظیم کننده مهم رشد است و در بسیاری از فرآیندهای مربوط به رشد و نمو دخالت دارد (احمد[15] و همکاران، ۲۰۱۶). سدیم نیترو پروساید با محیط زیست سازگار بوده و برای جلوگیری در فرسودگی مؤثر است (نایینگ[16] و همکاران، ۲۰۱۷). این ماده از طریق فعال نمودن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی نقش مهمی در کاهش تنش اکسیداتیو داشته و از طریق حفظ یکپارچگی غشاهای زیستی، کاهش گونه‌های اکسیژن فعال و تغییر در متابولیستم ترکیبات سلولی تحمل گیاه را در برابر تنش بهبود می‌بخشد (سوادکوهی[17] و همکاران، ۲۰۱۶). اکسید نیتریک (NO) و گونه‌های اکسیژن فعال مولکول‌های پیام‌دهنده آشکاری هستند که نقش مهمی در جوانه‌زنی بذر دارند (توماس[18] و همکاران، ۲۰۱۳؛ سارراف[19] و همکاران، ۲۰۲۰؛ کاتاریا و همکاران، ۲۰۲۰). تحقیقات نشان داده است که سدیم نیترو پروساید با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت اثرات نامطلوب تنش را در سویا بهبود بخشید (جابین و همکاران، ۲۰۲۱). فرسودگی بذر

[1] Hartman
[2] Kataria and Verma
[3] Jabeen
[4] Li
[5] Dantas
[6] Chandel
[7] Wang
[8] Zhan
[9] HajiMahmoodi

[10] Thakur
[11] Prajapati
[12] Rhaman
[13] Tania
[14] Anwar
[15] Ahmad
[16] Naing
[17] Savadkoohi
[18] Thomas
[19] Sarraf

به‌طور معنی‌داری سرعت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، میانگین جوانه‌زنی روزانه و ضریب جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد، اما پرایمینگ این صفات مذکور را تحت فرسودگی در گیاهان مختلف بهبود بخشید (سعادت[1] و همکاران، ۲۰۲۱؛۲۰۲۰؛ سعادت و صدقی[2]، ۲۰۲۱).

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت جهت کاهش اثرات فرسودگی و رادیکال‌های آزاد در بذر سویا بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار و سه سطح پیری تسریع شده (صفر، ۲۴ و ۴۸ ساعت) و چهار سطح سدیم نیترو پروساید (شاهد (آب مقطر)، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ انجام شد. طی آزمون پیری تسریع شده، بذرها در داخل آون با دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس و رطوبت نسبی ۲± ۹۵ درصد به مدت ۲۴ و ۴۸ ساعت قرار داده شدند. سپس بذرهای فرسوده به همراه شاهد در درون محلول‌های پرایمینگ به مدت ۹ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند. بعد از پرایمینگ، بذرها چندین بار توسط آب مقطر شستشو شدند، سپس، آزمون جوانه‌زنی استاندارد روی بذرها انجام شد. آزمون جوانه‌زنی به روش پتری در سه تکرار ۲۵ بذری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت نه روز انجام گرفت (ایستا[3]، ۲۰۱۲). در این روش، از کاغذهای صافی واتمن استفاده شد. کف ظرف با استفاده از یک لایه کاغذ صافی پوشانده و ۲۵ عدد بذر روی کاغذ صافی که با آب مقطر خیسانده شده بود، قرار گرفت. پس از بستن درب، ظرف به داخل ژرمیناتور منتقل شد. در این مرحله از آزمون، شمارش بذرها یک روز پس از انتقال بذرها به محیط‌های کشت آغاز شد و تا ثابت شدن جوانه‌زنی (نه روز) پس از کاشت ادامه یافت. معیار جوانه‌زنی یک بذر، خروج ریشه‌چه به میزان حداقل ۲ میلی‌متر از پوسته بذر در نظر گرفته شد. سپس، شاخص‌های جوانه‌زنی اندازه‌گیری شدند که در زیر ارائه شده است.

درصد جوانه‌زنی: جهت تعیین درصد جوانه‌زنی در پایان دوره جوانه‌زنی (۹ روز) تعداد کل بذرهای جوانه زده شمارش و یادداشت شد.

سرعت جوانه‌زنی: با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد (روبرتس و الیس[4]، ۱۹۸۰).

$$GR^{5} = \sum_{i=1}^{N} ni / ti \qquad [رابطه ۱]$$

ni: تعداد بذرهای جوانه زده در هر روز ti: تعداد روز تا شمارش nام.

سرعت جوانه‌زنی روزانه: با استفاده از رابطه ۲ به‌دست آمد (ماگویر[6] و همکاران، ۱۹۶۲).

$$DGR^{7} = 1/MDG^{8} \qquad [رابطه ۲]$$

MDG: میانگین جوانه‌زنی روزانه

ارزش جوانه‌زنی: با استفاده از رابطه ۳ به‌دست آمد (قاسمی گلعدانی و دلیل[9]، ۲۰۱۱).

$$GV^{10} = GP^{11} \times MDG \qquad [رابطه ۳]$$

GP: درصد جوانه‌زنی؛ MDG: میانگین جوانه‌زنی روزانه

میانگین جوانه‌زنی روزانه: با استفاده از رابطه ۴ به‌دست آمد (هوگنبوم و پیترسون[12]، ۱۹۸۷).

$$MDG = GP/Ti \qquad [رابطه ۴]$$

GP: درصد جوانه‌زنی؛ Ti: تعداد روزهای آزمایش

میانگین مدت جوانه‌زنی: با استفاده از رابطه ۵ به‌دست آمد (الیاس و روبرتس، ۱۹۸۱).

$$MGT^{13} = \Sigma t/\Sigma n \qquad [رابطه ۵]$$

t: تعداد بذر جوانه‌زده در روز؛ n: روز شمارش از اولین روز جوانه‌زنی

جهت تعیین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی در سویا، گیاهچه‌ها در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس در

[1] Saadat
[2] Saadat and Sedghi
[3] ISTA

[4] Ellis and Roberts
[5] Germination Rate
[6] Maguire
[7] Daily Germination Rate
[8] Mean Daily Germination
[9] Ghasemi Golazani and Delil
[10] Germination Value
[11] Germination Percentage
[12] Hoogenboom and Peterson
[13] Mean Germination time

داخل پتری درون ژرمیناتور به مدت ۹ روز رشد داده شدند و پس از باز شدن برگ‌های اولیه از هر تیمار ۵ گیاهچه به تصادف انتخاب کرده و بعد از قرار دادن در فویل آلومینیومی، به فریزر با دمای ۷۲- درجه سلسیوس منتقل گردیدند. به‌منظور استخراج عصاره آنزیمی، ۰/۵ گرم نمونه از هر تیمار وزن شده و در داخل هاون چینی (که از قبل در یخچال نگهداری شده بود) با استفاده از نیتروژن مایع هموژن گردید و بعد از آن ۵ میلی‌لیتر از بافر فسفات سرد (pH=۷/۵) حاوی ۰/۵ میلی‌مولار EDTA به هاون افزوده شد. سپس، هموژن‌ها به اپندورف‌های ۲ میلی‌لیتری منتقل شده و به مدت ۱۵ دقیقه با دمای ۴ درجه‌ی سلسیوس در ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ شدند. تمامی مراحل در روند تهیه عصاره آنزیمی در دمای ۴-۱ درجه‌ی سلسیوس انجام گرفت. جهت پیشگیری از انجماد و ذوب متوالی نمونه‌ها سوپرناتانت حاصل به سه قسمت تقسیم شد و تا زمان اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در دمای ۲۰- درجه‌ی سلسیوس نگهداری شدند (سایرام[1] و همکاران، ۲۰۰۲).

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز: سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش ابی[2] (۱۹۸۴) انجام شد. فعالیت آنزیم کاتالاز براساس واحد بر میلی گرم پروتئین در دقیقه بیان گردید.

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز: سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز طبق روش همدا و کلین[3] (۱۹۹۰) انجام شد. تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. در نتیجه فعالیت آنزیم پراکسیداز بر حسب واحد بر میلی گرم پروتئین در دقیقه گزارش شد.

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز براساس روش جیانوپلیتیس و ریز[4] (۱۹۷۷) مورد سنجش قرار گرفت. جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر قرائت شد.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز براساس ناکانو و اسادا[5] (۱۹۸۱) انجام گرفت. فعالیت آنزیم‌ها به‌وسیله اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۹۰ نانومتر بر حسب واحد بر میلی‌گرم بر پروتئین اندازه‌گیری شد.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افـزار SAS 9.4 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سـطح احتمال یک درصد اجرا گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی: اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی روی درصد جوانـه‌زنـی در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین نشان داد که درصد جوانـه‌زنـی در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر حدود ۱۰ درصد در مقایسه با شاهد افزایش نشان داد و این صفت با تشدید فرسودگی به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. به‌طوری که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در شاهد (بدون فرسودگی) و کم‌ترین آن در فرسودگی ۴۸ ساعت به دست آمد (جدول ۳ و ۴). پراکسیداسیون لیپیدها، نفوذپذیری غشای سلولی، افزایش تنفس، خسارت به فرآیند سنتز RNA، تخریب DNA و غیرفعال شدن آنزیم‌ها از دلایل عمده کاهش سرعت جوانه‌زنی در طی فرسودگی بذر هستند (لهنیر[6] و همکاران، ۲۰۰۸). توقف در آغاز فرآیند جوانه‌زنی نیز باعث کاهش جوانه‌زنی می‌شود (بایلی[7] و همکاران، ۲۰۰۲)، پژوهشگران علت توقف در آغاز فرآیند جوانه‌زنی را ترمیم خسارت غشای سلولی و شروع فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت درون بذر دانسته‌اند و این اتفاق پس از شروع مرحله جذب آب توسط بذر صورت می‌گیرد (موری و عیسی‌وند[8]، ۲۰۱۹) ۲۰۱۹) در این تحقیق، سدیم نیترو پروساید باعث افزایش درصد جوانه‌زنی شد که با نتایج تحقیق نصیبی[9] و همکاران (۲۰۰۹) روی گوجه فرنگی مطابقت داشت.

[1] Sairam
[2] Aebi
[3] Hemeda and Klein
[4] Giannopolitis and Ries
[5] Nakano and Asada
[6] Lehner
[7] Bailly
[8] Moori and Eisvand
[9] Nasibi

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر پرایمینگ و فرسودگی بر شاخص‌های جوانه‌زنی سویا

Table 1. Analysis of variance for deterioration and priming effects on germination indices in soybean

منابع تغییر S.O.V		درجه‌ی آزادی D.F.	میانگین مربعات Mean square		
			درصدجوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	سرعت جوانه‌زنی روزانه Daily germination rate
Priming (P)	پرایمینگ	3	168.77**	383.09**	0.00026724**
Aging (A)	فرسودگی	2	747.44**	239.77**	0.00142724**
P×A	پرایمینگ × فرسودگی	6	3.39 ns	52.84**	0.00000410ns
Error (E)	خطا	22	11.36	4.62	0.000023570
CV (%)	ضریب تغییرات (درصد)		4.35	7.64	4.65

ns و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۱ درصد

ns and ** indicating not significant and significant difference at p<0.01, respectively.

جدول ۱. ادامه

Table 1. Continued

منابع تغییر S.O.V		درجه ی آزادی D.F.	میانگین مربعات Mean square		
			میانگین مدت جوانه‌زنی Mean germination time	میانگین جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	ارزش جوانه‌زنی Germination value
Priming (P)	پرایمینگ	3	0.000774930**	2.637**	69113.6**
Aging (A)	فرسودگی	2	0.000365350**	11.678**	278610.5**
P×A	پرایمینگ × فرسودگی	6	0.00003338ns	0.053ns	2347.1ns
Error (E)	خطا	22	0/00001241	0.177	4132.8
CV (%)	ضریب تغییرات (درصد)	3	9.203	4.35	8.44

ns و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۱ درصد

ns and ** indicating not significant and significant difference at p<0.01, respectively.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر پرایمینگ و فرسودگی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در سویا

Table 2. Analysis of variance for aging and priming effects on antioxidant enzymes in soybean

منابع تغییر S.O.V		درجه آزادی D.F.	میانگین مربعات Mean square			
			کاتالاز Catalase	پراکسیداز Peroxidase	سوپراکسیددیسم وتاز Superoxide dismutase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase
Priming (P)	پرایمینگ	3	6.194*	309.32**	1046.4**	11. 652**
Aging (A)	فرسودگی	2	13.450**	981. 52**	1054.1**	2. 643**
P×A	پرایمینگ × فرسودگی	6	14.693**	43.15 **	2.6ns	0.049ns
Error (E)	خطا	22	1.214	8.92	14.3	0.730
CV (%)	ضریب تغییرات (درصد)		10.68	3.76	4.8	11.21

ns ، ** و * به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۱ و ۵ درصد

ns , ** and * indicating not significant, and significant difference at p<0.01 and p<0.05, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر ساده فرسودگی بر شاخص‌های جوانه‌زنی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در سویا

Table 3. Mean comparison for aging effect on germination indices and antioxidant enzymes in soybean

فرسودگی Aging	جوانه‌زنی (٪) Germination (%)	سرعت جوانه‌زنی روزانه Daily germination rate	میانگین مدت جوانه‌زنی (روز) Daily germination time (day)	میانگین جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	ارزش جوانه‌زنی Germination value	سوپراکسیددیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتدین بر دقیقه) Superoxide dismutase (unit mg^{-1} protein min^{-1})	آسکوربات پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) Ascorbate peroxidase (unit mg^{-1} protein min^{-1})
شاهد Control	86.56a	0.0927c	0.0326c	10.82a	939.4a	67.49c	7.11b
۲۴ ساعت 24hour	77.78b	0.1031b	0.0370b	9.72b	757.9b	78.90b	7.56ab
۴۸ ساعت 48hour	68.33c	0.1178a	0.0452a	8.54c	587.6c	89.12a	9.82a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at $p<0.05$ based on Duncan's multiple range test.

افزایش درصد جوانه‌زنی بذرهای فرسوده در نتیجه پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید به دلیل افزایش پاسخ‌های مولکولی و بیوشیمیایی در سطح سلول است که موجب القای سنتز هورمون‌های محرک جوانه‌زنی از جمله جیبرلین و اتیلن می‌شوند (سیروا[1] و همکاران، ۲۰۱۱؛ وایر[2] و همکاران، ۲۰۱۰). در این راستا، حیات[3] و همکاران (۲۰۱۴) افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها را به دلیل فعال‌سازی بتا دگلوکاناز و تحریک مسیر بیوسنتزی هورمون جیبرلین ذکر کرده‌اند. همچنین، افزایش درصد جوانه‌زنی در نتیجه استفاده از سدیم نیترو پروساید به دلیل نقش اکسید نیتریک در کاتابولیسم هورمون اسید آبسیزیک و تحریک مسیر پیام‌رسانی هورمون اتیلن می‌باشد که باعث افزایش تولید هورمون اتیلن شده که به تبع آن جوانه‌زنی تحت تنش افزایش می‌یابد (آرک[4] و همکاران، ۲۰۱۳). پرایمینگ با بازسازی و ترمیم سلول‌های آسیب دیده، کاهش موانع رشد جنین، افزایش سنتز پروتئین‌ها و ایجاد دامنه دمایی گسترده‌تر برای جوانه‌زنی، منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی می‌شود (مددی[5] و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که فرسودگی درصد جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد ولی پرایمینگ موجب افزایش این صفت می‌گردد (سعادت و همکاران، ۲۰۲۰؛ ۲۰۱۹؛ سعادت و صدقی، ۲۰۲۱) که نتایج این تحقیق با آن‌ها مطابقت دارد.

[1] Sirova
[2] Varier
[3] Hayat
[4] Arc
[5] Madady

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر ساده پرایمینگ بر شاخص‌های جوانه‌زنی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در سویا

Table 4. Mean comparison for priming effect on germination indices and antioxidant enzymes in soybean

سدیم نیترو پروساید (میلی‌گرم در لیتر) Sodium Nitroprusside (ppm)	جوانه‌زنی (٪) Germination (%)	سرعت جوانه‌زنی روزانه Daily germination rate	میانگین مدت جوانه‌زنی (روز) Daily germination time (day)	میانگین جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	ارزش جوانه‌زنی Germination value	سوپراکسیددیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) Superoxide dismutase (unit mg^{-1} protein min^{-1})	آسکوربات پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) Ascorbate peroxidase (unit mg^{-1} protein min^{-1})
شاهد Control	75.00b	0.1077a	0.0489a	9.37b	709.8b	66.06b	6.55c
100	75.11b	0.1076a	0.0332b	9.39b	712.2b	84.49a	7.49b
200	82.56a	0.0982b	0.0326b	10.32a	862.8a	85.1a	8.89a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at $p<0.05$ based on Duncan's multiple range test.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل پرایمینگ و فرسودگی بر شاخص‌های جوانه‌زنی و آنزیم‌های آنتی اکسیدانت ذر سویا

Table 5. Mean comparison for the interaction effect of priming and aging on germination indices and antioxidant enzymes in soybean

تیمار Treatment	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Germination Rate (Seed/day)	کاتالاز Catalase (units mg^{-1} protein min^{-1})	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase (units mg^{-1} protein min^{-1})
P1A1	22.20 cde	8.433 de	61.26 e
P1A2	20.67 de	9.533 cde	72.67 d
P1A3	19.15 e	11.067 bc	88.88 ab
P2A1	34.62 b	7.700 e	66.33 e
P2A2	32.41 b	10.133 cd	80.33 c
P2A3	26.0 c	12.233 ab	87.23 ab
P3A1	42.55 a	8.56 de	78.40 c
P3A2	32.29 b	11.20 bc	86.37 b
P3A3	23.30 cd	14.00 a	92.50 a

P1: شاهد، P2: سدیم نیترو پروساید ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، P3: سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، A1: بدون فرسودگی، A2: فرسودگی ۲۴ ساعت، A3: فرسودگی ۴۸ ساعت. حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است.

P1: Control, P2: Sodium nitroprusside 100 ppm, P3: sodium nitroprusside 200 ppm, A1: without aging, A2: aging 24 hour, A3: aging 48 hour. Different letters in each column indicate a significant difference at $p<0.05$ based on Duncan's multiple range test.

سرعت جوانه‌زنی: جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده و برهم‌کنش پرایمینگ و فرسودگی روی سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). طبق جدول مقایسه میانگین سرعت جوانـه‌زنـی در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و بدون فرسودگی در حدود ۵۵ درصد نسبت به شاهد و فرسودگی ۴۸ ساعت افزایش نشان داد (جدول ۵). کاهش سرعت جوانه‌زنی بذرهای فرسوده ناشی از کاهش در فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز است (رحمان و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، به دلیل این است که بذر جهت ترمیم خسارت‌های وارده شده به غشای سلولی، شروع مجدد فعالیت آنتی‌اکسیدانتی و ممانعت از بروز تنش اسیداتیو نیاز به زمان دارد و ترمیم این خسارت‌ها پس از جذب آب به وسیله بذر امکان‌پذیر است، در نتیجه مدت زمان برای تکمیل فرآیند جوانه‌زنی بذرهای فرسوده افزایش یافته که در نهایت کاهش سرعت جوانه‌زنی را به همراه دارد (گویل[1] و همکاران،

[1] Goel

۲۰۰۳). افزایش سرعت جوانه‌زنی در نتیجه پرایمینگ با سدیم نیتروپروساید به دلیل القای ساخت پروتئین‌های مرتبط با مسیر سیگنالی هورمون‌های رشد مانند جیبرلین و اتیلن است (سیرووا و همکاران، ۲۰۱۱). در واقع، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه کننده مانند آلفا و بتا آمیلاز و سنتز پروتئین (بهمنی و همکاران، ۲۰۱۶)، افزایش ATP، سنتز RNA و DNA، ارتقاء عملکرد میتوکندری (افضل[1] و همکاران، ۲۰۰۲) و ترمیم قسمت‌های آسیب دیده بذر (فاروق[2] و همکاران، ۲۰۰۶) و رشد سریع جنین در طی پرایمینگ باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی می‌شود. تحقیقات نشان داده است که فرسودگی سرعت جوانه‌زنی را در دانه‌های روغنی کاهش می‌دهد (یان[3] و همکاران، ۲۰۱۵؛ فو[4] و همکاران، ۲۰۱۵) و پرایمینگ با سدیم نیتروپروساید این صفت را افزایش داد (روحی[5] و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج تحقیقات دیگر نشان داده است که فرسودگی سرعت جوانه‌زنی را در لوبیا و برنج کاهش می‌دهد ولی پرایمینگ موجب افزایش این صفت می‌گردد (سعادت و صدقی، ۲۰۲۱؛ سعادت و همکاران، ۲۰۲۰) که با نتایج این تحقیق هم مطابقت دارد. گزارش‌ها نشان داده است که پرایمینگ بذرها با سدیم نیترو پروساید موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی نسبت به شاهد گردید (روحی و همکاران، ۲۰۱۹).

سرعت جوانه‌زنی روزانه: اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی بر سرعت جوانه‌زنی روزانه طبق جدول تجزیه واریانس در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱) و جدول مقایسه میانگین نشان داد که سرعت جوانه‌زنی روزانه در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر ۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (جدول ۴) و با افزایش فرسودگی این صفت به‌طور معنی‌دار افزایش یافت، به‌طوری که بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی روزانه در فرسودگی ۴۸ ساعت و کم‌ترین آن در شاهد (بدون فرسودگی) به‌دست آمد (جدول ۳ و ۴). در این تحقیق میانگین جوانه‌زنی روزانه طی پرایمینگ افزایش یافت و از آنجایی که سرعت جوانه‌زنی روزانه عکس میانگین جوانه‌زنی روزانه است، افزایش میانگین جوانه‌زنی روزانه باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی روزانه طی پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید شد. تحقیقات نشان داده است که سرعت جوانه‌زنی روزانه طی پرایمینگ کاهش می‌یابد (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳; سعادت و صدقی، ۲۰۲۱)، که با نتایج این تحقیق هم مطابقت داشت.

میانگین مدت جوانه‌زنی: جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی روی میانگین مدت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). همچنین، نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده بر میانگین مدت جوانه‌زنی نشان داد که بیش‌ترین میانگین مدت جوانه‌زنی در شاهد (پرایمینگ با آب مقطر) و کم‌ترین آن در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل گردید. فرسودگی این را صفت به‌طور معنی‌دار افزایش داد. به‌طوری که بیش‌ترین میانگین مدت جوانه‌زنی در فرسودگی ۴۸ ساعت و کم‌ترین آن در شاهد (بدون فرسودگی) به‌دست آمد (جدول ۳ و ۴). به دلیل شروع فرآیندهای متابولیکی اولیه طی پرایمینگ مدت زمان جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (سیوریتیپ[6] و همکاران، ۲۰۰۳). کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی در بذهای پرایم شده می‌تواند به دلیل کاهش مدت زمان لازم جهت جذب آب و شروع فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده باشد (نتوندو[7] و همکاران، ۲۰۰۴). در واقع، کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی طی پرایمینگ می‌تواند به دلیل شکسته شدن پروتئین‌ها و کربوهیدارت‌ها بر اثر آنزیم‌ها و واکنش‌های هیدرولیز کننده باشد که بذر را برای جوانه‌زنی آماده می‌کند (بیتیبکورت[8] و همکاران، ۲۰۰۴). بذر برای تعمیر خسارت وارد شده به غشا سلولی و شروع مجدد سامانه آنتی‌اکسیدانت و ممانعت از بروز تنش نیاز به زمان دارد و ترمیم این خسارت‌ها پس از پرایمینگ امکان پذیر است، در نتیجه مدت زمان لازم برای کامل شدن فرآیند جوانه‌زنی در بذرهای فرسوده

[1] Afzal
[2] Farooq
[3] Yin
[4] Fu
[5] Rouhi
[6] Sivritepe
[7] Netondo
[8] Bittebcourt

افزایش یافته که نتیجه آن افزایش زمان جوانه‌زنی است (بایلی و همکاران، ۲۰۰۰). تحقیقات نشان داده است که بذرهای فرسوده لوبیا میانگین مدت جوانه‌زنی بیش‌تری دارند ولی پرایمینگ باعث کاهش این صفت می‌شود (سعادت و همکاران، ۲۰۲۰)، که با نتایج این تحقیق هم مطابقت داشت.

میانگین جوانه‌زنی روزانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی روی میانگین جوانه‌زنی روزانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بیش‌ترین میانگین جوانه‌زنی روزانه در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کم‌ترین آن در شاهد (پرایمینگ با آب مقطر) بود. با افزایش فرسودگی کاهشی در میانگین جوانه‌زنی روزانه مشاهده شد. به‌طوری که، بیش‌ترین میانگین جوانه‌زنی روزانه در شاهد (شوری صفر) و کم‌ترین آن در فرسودگی ۴۸ ساعت بود (جدول ۳ و ۴). در این تحقیق، میانگین جوانه‌زنی روزانه طی فرسودگی کاهش یافت ولی پرایمینگ با سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید آن را افزایش داد، که با نتایج سعادت و صدقی (۲۰۲۱) مبنی بر تاثیر پرایمینگ و فرسودگی بر روی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر لوبیا مطابقت داشت. میانگین جوانه‌زنی روزانه، عکس سرعت جوانه‌زنی روزانه است. بنابراین، این صفت بیان‌کننده مدت زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر می‌باشد. در نهایت میزان سرعت جوانه‌زنی روزانه بیشتر باشد به همان نسبت میانگین جوانه‌زنی روزانه و به دنبال آن درصد جوانه‌زنی پایین خواهد بود.

ارزش جوانه‌زنی: اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی روی ارزش جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که بیش‌ترین ارزش جوانه‌زنی در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر (۸۶۲/۸) و کم‌ترین آن (۷۰۹/۸) در شاهد (پرایمینگ با آب مقطر) حاصل گردید و این صفت با تشدید فرسودگی کاهش یافت. به‌طوری که بیش‌ترین ارزش جوانه‌زنی در شاهد (بدون فرسودگی) (۹۳۹/۴) و کم‌ترین آن در فرسودگی ۴۸ ساعت (۵۸۷/۶) به‌دست آمد (جدول ۳ و ۴). ارزش جوانه‌زنی حاصلضرب درصد جوانه‌زنی و میانگین جوانه‌زنی روزانه است. در نتیجه افزایش این صفات تحت پرایمینگ با سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید موجب افزایش ارزش جوانه‌زنی خواهد شد. افزایش ارزش جوانه‌زنی با پرایمینگ تحت تنش در گیاهچه برنج توسط سعادت و صدقی (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است.

فعالیت آنزیم کاتالاز: تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی و برهم‌کنش آن‌ها روی فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز از پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و فرسودگی ۴۸ ساعت مشاهده شد و کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و بدون فرسودگی مشاهد شد (جدول ۵).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده و متقابل پرایمینگ و فرسودگی روی فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و فرسودگی ۴۸ نسبت به شاهد در حدود ۳۴ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵).

فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز: طبق جدول تجزیه واریانس اثر ساده پرایمینگ و فرسودگی روی فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسمیوتاز و آسکوربات پراکسیداز به ترتیب (۸۵/۱ و ۸/۸۹ واحد میلی‌گرم بر پروتئین در دقیقه) در پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کم‌ترین آن‌ها به ترتیب (۶۶/۰۶ و ۶/۵۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) در شاهد (پرایمینگ با آب مقطر) حاصل گردید. این صفات با تشدید فرسودگی به‌طور معنی‌دار افزایش یافتند. به‌طوری که بیش‌ترین آنزیم سوپراکسیددیسمیوتاز (۸۹/۱۲ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) و آسکوربات پراکسیداز (۹/۸۹ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) در فرسودگی ۴۸ ساعت و کم‌ترین آن‌ها به ترتیب در شاهد (بدون فرسودگی) (۶۷/۴۹ و ۷/۱۱ واحد

بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) به دست آمد (جدول ۳ و ۴).

در این تحقیق، فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز طی فرسودگی افزایش یافتند و پرایمینگ با سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید آن را بهبود بخشید، که با نتایج تحقیقات دیگر مطابقت داشت (سعادت و صدقی، ۲۰۲۱; سعادت و همکاران، ۲۰۱۹; نظری[1] و همکاران، ۲۰۲۰; عالم[2] و همکاران، ۲۰۱۹; فتحی[3] و همکاران، ۲۰۱۸). پرایمینگ با سدیم نیترو پروساید رونویسی و بیان ژن‌های کدکننده کاتالاز را القا می‌کند (کیاو[4] و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش آنزیم کاتالاز در اثر پرایمینگ می‌تواند به دلیل بهبود و تسریع سنتز DNA در بافت‌های جنینی در طول پرایمینگ در بذرها باشد (مددی و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش آنزیم پراکسیداز به‌معنی حذف بیش‌تر رادیکال‌های اکسیژن فعال و در نهایت تأخیر در مرگ سلولی و افزایش تحمل گیاهچه‌ها است (نیر و همکاران، ۲۰۰۸). سدیم نیترو پروساید با رهاسازی اکسید نیترک موجب افزایش پراکسیداز شده و با تبدیل یون‌های سوپراکسید به پراکسید هیدروژن و اکسیژن مولکولی، موجب حفاظت سلول‌ها در برابر رادیکال‌های آزاد می‌شود (لیی[5] و همکاران، ۲۰۰۷). طی طی فرسودگی میتوکندری که یکی از اندامک‌های تولیدکننده سوپراکسیددیسموتاز است، دچار آسیب شده در نتیجه این آنزیم کاهش می‌یابد (اکسیا[6] و همکاران، ۲۰۱۵). اثر حفاظتی اکسید نیتریک در نتیجه استفاده از سدیم نیترو پروساید تحت تنش می‌تواند به دلیل ترمیم میتوکندری و توانایی اکسید نیتریک در القای فعالیت سوپراکسید دیسمیوتاز باشد (روحی و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از سدیم نیترو پروساید سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز شد، می‌توان نتیجه گرفت که این ماده با افزایش این آنزیم باعث بین بردن رادیکال‌های آزاد شده و از تجمع گونه‌های اکسیژن فعال جلوگیری می‌کند (بلیقنی و لاماتینا[7]، ۲۰۰۱). افزایش آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز با پرایمینگ تحت شرایط تنش نیز گزارش شده است (سعادت و صدقی، ۲۰۲۱). مطالعات نشان داد که پرایمینگ بذرها با سدیم نیترو پروساید موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز نسبت به شاهد گردید (روحی و همکاران، ۲۰۱۹) که با نتایج این تحقیق هم مطابقت داشت. فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در شرایط فرسودگی در بذر عدس نیز افزایش می‌یابد (مهرکیش[8] و همکاران، همکاران، ۲۰۲۱). آنزیم آسکوربات پراکسیداز در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از قبیل رشد و نمو و متابولیسم نقش داشته و به عنوان یک احیا کننده برای رادیکال‌های آزاد به‌ویژه پراکسید هیدروژن عمل می‌کند و صدمات ناشی از تنش اکسیداتیو را به کم‌ترین مقدار می‌رساند (آرورا[9] و همکاران، ۲۰۰۲؛ ایسرار و ساهی[10]، ۲۰۰۶). اکسید نیتریک به‌طور مستقیم بر نابودی رادیکال‌های آزاد تاثیر گذاشته و به‌طور غیرمستقیم با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه به‌ویژه تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت باعث کاهش غلظت رادیکال آزاد و در نهایت کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود (پانادا[11] و همکاران، ۲۰۱۱). تحقیقات نشان داده است که پیش‌تیمار با سدیم نیترو پروساید تحت تنش موجب افزایش آنزیم آسکوربات پراکسیداز نسبت به شاهد می‌شود (روحی و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسدی کرم[12] و همکاران، ۲۰۱۶). شئوکاند[13] و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه اثر پیش‌تیمار سدیم نیترو پروساید بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در بذرهای نخود گزارش کردند که افزایش در القای mRNAs کد کننده این آنزیم موجب افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز شده است. همچنین، ژنگ[14] و همکاران (۲۰۰۹) اظهار کردند اکسید نیتریک با تاثیر بر دنباله‌های تیول آنزیم‌های

[1] Nazari
[2] Aalam
[3] Fathi
[4] Qiao
[5] Lei
[6] Xia
[7] Beligni and Lamattina
[8] Mehrkish
[9] Arora
[10] Israr and Sahi
[11] Panda
[12] Asadi karam
[13] Sheokand
[14] Zheng

کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز می‌تواند رونویسی و فعالیت این آنزیم‌ها را تحت تنش افزایش دهد. در حالت کلی، بذرهای فرسوده به علت کاهش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی و تخریب در دیواره سلولی در جذب آب دچار مشکل می‌شوند. پرایمینگ باعث تعمیر در دیواره سلولی و افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی شده و از این طریق شاخص‌های جوانه‌زنی در بذرهای فرسوده به علت تغییر در بعضی از فعالیت‌های مولکولی افزایش می‌یابد. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت تحت تنش‌ها که فرسودگی هم نوعی تنش به حساب می‌آید، در اثر پرایمینگ، به دلیل سنتز DNA در جنین در طی پرایمینگ و در غیاب سلول‌های تقسیم شونده و افزایش سرعت سنتز DNA در افت جنین و افزایش در سرعت سنتز پروتئین است (برای[1] و همکاران، ۱۹۸۹).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که فرسودگی می‌تواند اثرات معنی‌داری در کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در گیاهچه سویا در آزمایشگاه داشته باشد که احتمالا به‌دلیل تجمع رادیکال‌های اکسیژن و تنش اکسیداتیو است. همچنین، نتایج نشان داد که سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید سبب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی در شرایط فرسودگی می‌شود. به عبارتی در شرایط فرسودگی بذرها، جوانه‌زنی بذرهای تیمار شده نسبت به بذرهای شاهد سریع‌تر آغاز خواهد شد و اسید نیتریک حاصل از سدیم نیترو پروساید از راه افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت موجب کاهش اثرات سوء فرسودگی می‌شود.

[1] Bray

منابع

Aalam, L., Sedghi, M. and Sofalian, O. 2019. Sodium nitroprusside and salicylic acid decrease antioxidant enzymes activity in soybean. Iranian Journal of Plant Physiology, 10(1): 3073-3077.

Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. Methods in Enzymology, 105: 121-126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3

Afzal, I., Ahmad, N., Basra, S.M.A., Ahmadand, R. and Iqbal, A. 2002. Effect of different seed vigor enhancement techniques on hybrid maize (*Zea mays* L.). Journal of Agricultural Science, 39: 109-112.

Ahmad, P., Abdel Latef, A.A., Hashem, A., Abd Allah, E.F., Gucel, S. and Tran, L.S. 2016. Nitric oxide mitigates salt stress by regulating levels of osmolytes and antioxidant enzymes in chickpea. Plant Science, 7: 347-353. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00347

Anwar, M.P., Jahan, R., Rahman, M.R., Islam, A K. M. and Uddin, F.M.J. 2021. Seed priming for increased seed germination and enhanced seedling vigor of winter rice. Environmental Earth Sciences, 756: 1-7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012047

Arc, E., Sechet, J., Corbineau, F., Rajjou, .L. and Marionpoll, A. 2013. ABA crosstalk with ethylene and nitric oxide in seed dormancy and germination. Plant Science, 4: 1-19. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00063

Arora, A., Sairam, R. and Srivastava, G. 2002. Oxidative stress and antioxidative system in plants. Current Science, 82: 1227-1238.

Asadi karam, E., Keramat, B. and Mozaffari, H. 2016. Reducing arsenic toxicity stress in soybean (*Glycine max* L.) by using of sodium nitroprusside. Journal of Crop Ecophysiology, 1(37): 225-242. [In Persian, with English Abstract]

Bailly, C., Bogatek-Leszczynska, R., Côme, D. and Corbineau, F. 2002. Changes in activities of antioxidant enzymes and lipoxygenase during growth of sunflower seedlings from seeds of different vigour. Seed Science Research, 12: 47-55. https://doi.org/10.1079/SSR200197

Beligni, M.V. and Lamattina, L. 2001. Nitric oxide in plants the history is just beginning. Plant, Cell and Environment, 24: 267-278. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00672.x

Bittebcourt, M.L.C., Dais, D.C.F.S., Dias, L.A.S. and Araujo, E.F. 2004. Effect of priming on asparagus seed germination and vigor under water and temperature stress. Journal of Seed Science and Technology, 32: 607-616. https://doi.org/10.15258/sst.2004.32.2.29

Bray, C.M., Davision, P.A., Ashraf, M. and Taylor, R.M. 1989. Biochemical changes during osmopriming of leek seed. Annals of Botany, 63: 185-193. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087722

Chandel, R.K., Khan, Z. and Gandotra, S. 2015. Alterations in protein and isozymes profiles during accelerated ageing in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). Journal of Functional and Environmental Botany, 5(1): 64-69. https://doi.org/10.5958/2231-1750.2015.00010.4

Dantas, A.F., Fascineli, M.L., Jose, S.C.B.R., Padua, J.G., Gimenes, M.A. and Grisolia, C.K. 2019. Loss of genetic integrity in artificially aged seed lots of rice (*Oryza sativa* L.) and common bean (Phaseolus vulgaris L.). Mutation Research, 846: 1-6. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2019.07.008

Farooq, M., Basra, S.M.A., Tabassum, R. and Afzal, I. 2006. Enhancing the performance of direct seeded fine rice by seed priming. Plant Production Science, 9: 446-756. https://doi.org/10.1626/pps.9.446

Fathi, A., Baradaran, M. and Amirian, M.R. 2017. The effect of nitric oxide on seed germination and activities of some antioxidant enzymes in sesame under salt stress. Iranian Journal of Seed Sciences and Research, 5(3): 88-77. [In Persian, with English Abstract]

Fu, Y.B., Ahmed, Z. and Diederichsen, A. 2015. Towards a better monitoring of seed ageing under ex situ seed conservation. Conservation Physiology, 3: 1-16. https://doi.org/10.1093/conphys/cov026

Ghasemi Golazani, K. and Delil, B. 2011. Germination tests and seed strength. Jihade Daneshgahi Publications. 104 p. [In Persian]

Giannopolitis, C.N. and Ries, S.K. 1977. Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. Journal of Plant Physiology, 59: 309-314. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309

Goel, A., Goel, A.K. and Sheoran, I.S. 2003. Changes in oxidative stress enzymes during artificial ageing in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seeds. Plant Physiology, 160: 1093-1100. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00881

HajiMahmoodi, M., Bakhshandeh, A.M., Moosavi, S.A. and Siadat, S.A. 2021. Quantification of seed aging on seed germination properties of Wild mustard (*Sinapsis arvensis*) under salinity stress. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 10(1): 42-58. [In Persian with English Summary]

Hartman, G.L., West, E.D. and Herman, T.K. 2011. Crops that feed the World 2. Soybean worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. Food insecurity, 3: 5-17. https://doi.org/10.1007/s12571-010-0108-x

Hayat, S., Yadav, S., Alyemeni, M.N. and Ahmad, A. 2014. Effect of sodium nitroprusside on the germination and antioxidant activities of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Bulgarian Journal of Agricultural Science, 20(1): 140-144.

Hemeda, H.M. and Klein, B.P. 1990. Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetable extracts. Journal of Food Science, 55: 184-185. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06048.x

Hoogenboom, G. and Peterson, C.M. 1987. Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. Agronomy Journal, 79(4): 598-607. https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900040004x https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900040003x

Israr, M. and Sahi, S.V. 2006. Antioxidative responses to mercury in the cell cultures of *Sesbania drummondi*. Plant Physiology and Biochemistry, 44: 590-595. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.09.021

ISTA. 2012. International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland: The International Seed Testing Association (ISTA).

Jabeen, Z., Fayyaz, H.A., Irshad, F., Hussain, N. and Hassan, M.N. 2021. Sodium nitroprusside application improves morphological and physiological attributes of soybean (*Glycine max* L.) under salinity stress. Plos One, 16(4): e0248207 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248207

Kataria, S. and Verma. S.K. 2018. Salinity stress responses and adaptive mechanisms in major glycophytic crops: The Story So Far. In: Wani, V., Uprasanna, S.H.S. and Tran, L.P. (eds.), Salinity Responses and Tolerance in Plants. Targeting Sensory, Transport and Signaling Mechanisms Springer. Cham. Switzerland, pp. 1-39. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75671-4_1

Lehner, A., Mamadou, N., Poels, P., Come, D., Bailly, C. and Corbineau, F. 2008. Change in soluble carbohydrates, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in the embryo during aging in wheat grains. Journal of Cereal Science, 47: 555-565. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.017

Lei, Y., Yin, C., Ren, J. and Li, C. 2007. Effect of osmotic stress and sodium nitroprusside pretreatment on proline metabolism of wheat seedlings. Plant Biology, 516: 386-390. https://doi.org/10.1007/s10535-007-0082-0

Li, Y., Wang, Y., Xue, H., Pritchard, H.W. and Wang, X. 2017. Changes in the mitochondrial protein profile due to ROS eruption during ageing of elm (*Ulmus pumila* L.) seeds. Plant Physiology and Biochemistry, 114: 72-87. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.02.023

Li, Z., Pei, X., Yin, S., Lang, X., Zhao, X. and Qu, G. Z. 2019. Plant hormone treatments to alleviate the effects of salt stress on germination of *Betula platyphylla* seeds. Journal of Research in Medical Sciences, 30(3): 779-787. https://doi.org/10.1007/s11676-018-0661-2

Madady, M., Khomari, S., Javadi, A. and Sofalian, A. 2016. The effect of priming with calcium nitrate and zinc oxide on seed germination and seedling growth of corn cockle under salinity stress. Journal of Plant Process and Function, 5(15): 169-179. [In Persian, with English Abstract]

Maguire, J.D. 1962. Speed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. Crop Science, 2: 176-177. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

Mehrkish, M., Ghobadi, M. and Jalali Honarmand, S. 2021. Evaluation the ability of seed priming with selenium to improving deteriorated seeds in lentil (*Lens culinaris* Medic). Iranian Journal of Seed Sciences and Research, 8(1): 13-28. [In Persian, with English Abstract]

Moori, S. and Eisvand, H. R. 2019. The effect of priming with salicylic acid and ascorbic acid on germination indices and biochemical traits in wheat seed deterioration. Iranian Journal of Seed Science and Research, 6(3): 381-398. [In Persian, with English Abstract]

Naing, A.H., Lee, K., Arun, M., Lim, K.B. and Kim, C.K. 2017. Characterization of the role of sodium nitroprusside (SNP) involved in long vase life of different carnation cultivars. BMC Plant Biology, 17:149. https://doi.org/10.1186/s12870-017-1097-0

Nakano, Y. and Asada, K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology, 22: 867-880.

Nasibi, F., Manouchehri Kalantari, K. and Khudashanas, M. 2009. The effect of sodium nitroprusside (SNP) pretreatment on some biochemical factors of tomato (*Lycopersicun esculentum*) seedlings under drought stress. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 16(2): 121-133. [In Persian with English Summary]

Nazari, R., Parsa, S., Afshari, R. and Mahmodi, S. 2020. The effect of seed priming with salicylic acid on the activity of antioxidant enzymes and fat peroxidation in deteriorated seeds (*Glycine max* (L.) Merrill, Williams variety). Iranian Journal of Seed Science and Technology, 9(1): 50-57. [In Persian with English Summary]

Netondo, G. W., Onyango, J. and Beck, E. 2004. Sorghum and Salinity: I. Response of growth, water relation, and ion accumulation to NaCl salinity. Crop Science, 44: 797-805. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.7970

Panda, P., Nath, Sh., Chanu, Th., Sharma, G.D. and Panda, S.K. 2011. Cadmium stress induced oxidative stress and role of nitric oxide in rice (*Oryza sativa* L.). Acta Physiologiae Plantarum, 33: 1737-1747. https://doi.org/10.1007/s11738-011-0710-3

Prajapati, R., Kataria, S. and Jain, M. 2020. Seed priming for alleviation of heavy metal toxicity in plants: An overview. Plant Science Today, 7: 308-313. https://doi.org/10.14719/pst.2020.7.3.751

Qiao, W., Li, C. and Fan, L.M. 2014. Cross-talk between nitric oxide and hydrogen peroxide in plant responses to abiotic stresses. Environmental and Experimental Botany, 100: 84-93. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.014

Rhaman, M.S., Rauf, F., Tania, S.S. and Khatun, M. 2020. Seed priming methods: application in field crops and future perspectives. Asian Journal of Crop Science, 5: 8-19. https://doi.org/10.9734/ajrcs/2020/v5i230091

Roberts, E.H. and Ellis, R.H. 1980. Seed physiology and seed quality in soybean. In Advances in Legume Science (eds R.J. Summerfield and A.H. Bunting), pp. 297-312. HMSO, London.

Rouhi, H.R., Moradi, A., Saman, M., Shahbodaghlo, A. and Mohammadi. Y, 2019. Seed priming with SNP improves the performance of aged pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds under drought stress. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 8(1): 67-81. [In Persian with English Summary]

Saadat, H. and Sedghi, M. 2021. Effect of priming and aging on Physiological, biochemical traits seed common bean (*Phaseolus vulgaris* L. Sadri var.). Journal of Seed Research, 11(3): 75-89. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.30495/jsr.2022.1945870.1228

Saadat, T., Alidost, H. and Sedghi, M. 2021. Effect of priming on the germination of rice seeds of different vigor. Journal of Seed Research, 10(4): 65-73. [In Persian, with English Abstract]

Saadat, T., Sedghi, M., Gholipouri, A., Seyed Sharifi, R. and Sheykhbaglou, R. 2019. The effect of priming deterioration on the activity of antioxidant enzymes and the mobility of seed reserves in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Sadri. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 8(2): 19-32. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.22034/ijsst.2018.116851.1154

Saadat, T., Sedghi, M., Gholipouri, A., Seyed Sharifi, R. and Sheykhbaglou, R. 2020. Effect of seed priming and aging on germination, biochemical traits and antioxidant enzyme gene expression in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Seed Science and Research, 7(1): 1-13. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.22124/jms.2020.4267

Saadat, T., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R. and Farzaneh, S. 2023. Effect of chitosan on germination indices of common bean (*Phaseolus vulgaris*) (cv. Sedri) seeds under salt stress. Iranian Journal of Seed Research, 9(2): 151-162. [In Persian with English Summary] https://doi.org/10.61186/yujs.9.2.151

Sairam, R.K., Rao, K.V. and Srivastava, G.C. 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. Plant Science, 163: 1037-1046. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9

Sarraf, M., Kataria, S., Taimourya, H., Santos, L., Menegatti, R., Jain, M., Ihtisham, M. and Liu, S. 2020. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. Plants, 9: 1139. https://doi.org/10.3390/plants9091139

Savadkoohi, S., Saeidi, S., Abbaspour, H. and Dehpour, A. 2016. Effect of different concentrations of Zinc and their interaction with sodium nitroprusside (SNP) on physiological and biochemical parameters of *Planttago major* L. Iranian Journal of Plant Physiology, 7(3): 2113-2123. [In Persian, with English Abstract]

Sheokand, S., Bhankar, V. and Sawhney, V. 2010. Ameliorative effect of exogenous nitric oxide on oxidative metabolism in NaCl treated chickpea plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, 22(2): 81-90. https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000200002

Sirova, J., Sedlaova, M., Piterkova, J., Luhova, L. and Petrivalsky, M. 2011. The role of nitric oxide in the germination of plant seeds and pollen. Plant Science, 181: 560-572. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.03.014

Sivritepe, N., Sivritepe, H.O. and Eris, A. 2003. The effects of NaCl priming on salt tolerance in melon seedling grown under saline conditions. Scientia Horticulturae, 97: 229-237. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00198-X

Tania, S.S., Rhaman, M.S. and Hossain, M.M. 2020. Hydro-priming and halo-priming improve seed germination, yield and yield contributing characters of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). Trop. Plant Research, 7: 86-93. https://doi.org/10.22271/tpr.2020.v7.i1.012

Thakur, M., Sharma, P. and Anand, A. 2019. Seed Priming-Induced Early Vigor in Crops: An Alternate Strategy for Abiotic Stress Tolerance. Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings, pp.163-180. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_8

Thomas, S., Anand, A., Chinnusamy, V., Dahuja, A. and Basu, S. 2013. Magnetopriming circumvents the effect of salinity stress on germination in chickpea seeds. Acta Physiologiae Plantarum, 35: 3401-3411. https://doi.org/10.1007/s11738-013-1375-x

Varier, A., Vari, A.K. and Dadlani, M. 2010. The subcellular basis of seed priming. Current Science, 99(4): 450-456.

Wang, R., Wu, F., Xie, X. and Yang, C. 2021. Quantitative trait locus mapping of seed vigor in soybean under - 20◦C storage and accelerated aging conditions via RAD sequencing. Molecular Biology, 43: 1977-1996. https://doi.org/10.3390/cimb43030136

Xia, F., Wang, X., Li, M. and Mao, P. 2015. Mitochondrial structural and antioxidant system responses to aging in oat (*Avena sativa* L.) seeds with different moisture contents. Plant Physiology and Biochemistry, 94: 122-129. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.06.002

Yin, X., He, D., Gupta, R. and Yang, P. 2015. Physiological and proteomic analyses on artificially aged Brassica napus seeds. Plant Science, 6: 1-11. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00112

Zhan, J., Li, W., He, H.Y., Li, C.Z. and He, L.F. 2014. Mitochondrial alterations during Alinduced PCD in peanut root tips. Plant Physiology and Biochemistry, 75: 105-113. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.12.010

Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Liu, W., Jing, Q. and Cao, W. 2009. Exogenous nitric oxide improves seed germination in wheat against mitochondrial oxidative damage induced by high salinity. Environmental and Experimental Botany, 67(1): 222-227. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.05.002