

Effect of seed priming with salicylic acid on germination and biochemical traits of bread wheat (*Triticum aestivum* cv. Sain) under salinity stress

Haniyeh Saadat ^{1,*}, Mohammad Sedghi ²

Extended abstract

Introduction: The world population is expected to increase rapidly until 2050. For this reason, it is thought that the existing lands will be insufficient for growing grains in order to meet the increasing food needs in the future. The decrease in agricultural lands as a result of the increase in biotic and abiotic stress factors are among the important obstacles to agriculture. Wheat, an annual herbaceous plant, is used as a basic and strategic nutrient both in Iran and in the world. Salinity is one of the major abiotic stresses that threaten global food security by impacting agricultural production, particularly in arid and semi-arid regions of the world. Seed pretreatment is a technique for minimizing emergence time, ensuring consistent germination, and improving crop performance. It is a treatment at pre-sowing, leading to a physiological condition that improves the seed to germinate. The aim of this study was to evaluate the effect of seed priming with salicylic acid on germination and biochemical traits of wheat under salinity stress.

Materials and Methods: The experiment was conducted as factorial arrangement based on a completely randomized design with four replications at the laboratory of the Faculty of Agriculture University of Mohaghegh Ardabili in 2024. Experimental treatments included four salinity levels (0, 50, 100, and 200 mM NaCl) and four levels of salicylic acid (0, 0.1, 0.5 and 1 mM).

Results: The results showed that salinity stress decreased germination percentage and increased the amount of proline and soluble sugars content, but priming with hydro, salicylic acid 0.1 and 0.5 mM especially salicylic acid 1mM improved these traits. The proline and soluble sugars content in priming with 1mM salicylic acid application were 22% and 43% higher than the control (distilled water). The activity of catalase enzyme in 1 mM salicylic acid treatment and salinity of 200 mM compared with the control showed an increase about 61%. Also the highest amount of α -amylase enzyme activity (4.40 mg maltose g⁻¹ FW seed min⁻¹) was obtained in the treatment with 1 mM salicylic acid and without salinity.

Conclusions: The results of this research showed that seed hydropriming (distilled water), and different levels of salicylic acid, especially 1mM salicylic acid by stimulating antioxidant enzymes and neutralizing free radicals can be considered as a growth enhancer and reduce the adverse effects of salinity in wheat plant.

Keywords: *Amylase, Proline, Salicylic Acid, Sodium Chloride, Soluble Sugars*

Highlights:

1. Seed priming with distilled water, and 1mM salicylic acid improved germination percentage of wheat seed under salinity.
2. Hydropriming and 1mM salicylic acid increased the activity of catalase, α -amylase, proline and soluble sugars content.
3. Priming with 1mM salicylic acid showed a better effect than other treatments on germination indices and biochemical characteristics.

¹ Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

² Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

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

DOI: [10.61186/yujs.11.2.111](https://doi.org/10.61186/yujs.11.2.111)



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/>).

Received: 7.6.2024; Revised: 23.10.2024;
Accepted: 26.10.2024; Online Published: 21.3.2025

تأثیر پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک روی جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی گیاهچه گندم نان (*Triticum aestivum*) رقم سائین تحت تنش شوری

هانیه سعادت^{۱*}، محمد صدقی^۲

چکیده مبسوط

مقدمه: انتظار می‌رود جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به سرعت افزایش یابد، به همین دلیل، تصور می‌شود که زمین‌های موجود برای رشد غلات جهت تامین نیازهای غذایی فزاینده در آینده ناکافی باشند. کاهش اراضی کشاورزی در نتیجه افزایش عوامل تنش زیستی و غیرزیستی از جمله موانع مهم کشاورزی است. گندم یک گیاه علفی یکساله به عنوان یک ماده غذایی اساسی و راهبردی هم در ایران و هم در جهان استفاده می‌شود. شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که امنیت غذایی را در جهان با تأثیر بر تولیدات کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تهدید می‌کند. پیش تیمار بذر روشی برای به حداقل رساندن زمان سبز شدن، تضمین جوانه‌زنی مداوم و بهبود عملکرد محصول است، پیش تیمار یک تیمار قبل از کاشت است که منجر به شرایط فیزیولوژیکی می‌شود که جوانه‌زدن بذر را بهبود می‌بخشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک روی جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی گیاهچه گندم تحت تنش شوری اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۳ انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی مولار کلرید سدیم) و چهار سطح اسیدسالیسیلیک (صفر، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میلی مولار) بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تنش شوری موجب کاهش درصد جوانه‌زنی و افزایش مقدار پرولین و محتوای قندهای محلول گردید، ولی هیدرو پیش تیمار، و پیش تیمار با اسید سالیسیلیک ۰/۱ و ۰/۵ میلی مولار به‌ویژه اسید سالیسیلیک یک میلی مولار این صفات را بهبود بخشید. مقدار پرولین و محتوای قندهای محلول در پیش تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار به ترتیب در حدود ۲۲ و ۴۳ درصد نسبت به شاهد (آب مقطر) بیشتر بود. فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار و شوری ۲۰۰ میلی مولار نسبت به شاهد در حدود ۶۱ درصد افزایش نشان داد. هم‌چنین، بیش‌ترین فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز (۴/۴۰ میلی گرم مالتوز بر گرم وزن تر بذر در دقیقه) در تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار و بدون شوری به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که هیدروپیش تیمار بذر، و پیش تیمار با سطوح مختلف اسید سالیسیلیک به‌ویژه اسید سالیسیلیک یک میلی مولار با تحریک آنزیم‌های پاداکسیدانت و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد می‌تواند به عنوان بهبوددهنده رشد و کهنه اثرات نامطلوب شوری در گیاه گندم مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: اسید سالیسیلیک، آمیلاز، پرولین، قندهای محلول، کلرید سدیم

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- پیش تیمار بذر با آب و اسید سالیسیلیک یک میلی مولار سبب بهبود درصد جوانه‌زنی بذر گندم تحت شرایط شوری گردید.
- ۲- پیش تیمار بذر با آب و اسید سالیسیلیک یک میلی مولار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آلفا آمیلاز، پرولین و قندهای محلول را افزایش داد.
- ۳- پیش تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار تأثیر بهتری نسبت به سایر تیمارها بر شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی نشان داد.

^۱ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

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

DOI: 10.61186/yujr.11.2.111



CrossMark

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

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین منبع اصلی تغذیه برای اکثریت مردم در جهان است (محمد^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). این گیاه دارای پروتئین، ویتامین‌ها (۲۵-۲۰٪) و فیبرهای غذایی می‌باشد (مقدم^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). بهترین تولید گندم را می‌توان در محیطی عاری از تنش به‌دست آورد، با این حال عوامل غیرزیستی از جمله تنش شوری بر جوانه‌زنی بذر و استقرار آبی گیاهچه گندم توسط محققان مورد تأیید قرار گرفته است (قلی‌نژاد^۳، ۲۰۱۴).

تنش شوری تقریباً شناخته شده‌ترین علت محدودیت رشد در بین تنش‌های محیطی است که باعث ایجاد تنش اسمزی در اطراف بذر شده و جذب آب توسط بذر را محدود می‌کند، در نتیجه مانع جوانه‌زنی بذر یا تاخیر آن می‌گردد (گو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). شوری باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی برنج می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژن، از جمله پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های سوپراکسید، باعث آسیب اکسیداتیو به اجزای سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA می‌شوند. این تنش اکسیداتیو عملکرد طبیعی سلولی را مختل کرده و می‌تواند منجر به مرگ سلولی شود (حسین^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). حسن‌زمان^۶ و همکاران، ۲۰۲۱. شوری ناشی از تجمع عناصر سدیم و کلر باعث اختلال تعادل یونی در سلول‌ها شده و با کاهش جذب عناصر ضروری، جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (پاپن^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). کاهش توانایی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه به دلیل شوری با غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار و ۴ و ۸ دسی‌زیمنس در گونه‌های مختلف زراعی از جمله برنج (سعادت^۸ و همکاران، ۲۰۲۳) و گندم (الباجی و مرعشی^۹، ۲۰۲۴) گزارش شده است.

برای ایجاد سازوکارهای دفاعی مختلف، مانند دفاع پاداکسیدانسی و تنظیم اسمزی در برابر شوری از پیش‌تیمار استفاده می‌شود (وان زلم^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰). پیش‌تیمار شامل جذب آب و خشک کردن بذرهای برای بهبود فرآیندهای متابولیک قبل از جوانه‌زنی است (رحمان^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۱). پیش‌تیمار بذر، تولید گونه‌های اکسیژن فعال را تنظیم و آن‌ها را سم-زدایی می‌کند که منعکس کننده پاسخ‌های دفاعی آنزیم‌های پاداکسیدانت طی پیش‌تیمار است (پیری^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۱). و می‌تواند به بذرهای در ایجاد تحمل متقاطع در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند سمیت یونی، تنش شوری و تنش اسمزی کمک کند (الحمد^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۳). گیاهچه‌های حاصل از بذرهای تیمارشده گندم با اسید سالیسیلیک تحت تنش شوری جوانه‌زنی زود هنگام و یکنواخت‌تری دارند (عبدی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۲). پیش‌تیمار هورمونی یکی از روش‌های رایج پیش‌تیمار است که در آن بذرهای فیتوهورمون‌های ضروری مانند اسیدسالیسیلیک برای بهبود جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در شرایط تنش خیس‌مانده می‌شوند (رحمان و همکاران، ۲۰۲۱).

اسید سالیسیلیک ترکیب فنلی طبیعی و تنظیم کننده رشد گیاه است که در متابولیسم و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش‌های غیرزیستی مختلف از جمله شوری موثر می‌باشد. علاوه بر این، نقش‌های مختلفی در رشد گیاه و فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله جوانه‌زنی بذر ایفا می‌کند. پیش‌تیمار بذر با اسید سالیسیلیک باعث بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم در شرایط تنش شوری می‌شود (تانیا^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۱). هورمون‌های گیاهی مانند اسید سالیسیلیک و جیبرلین پاسخ‌های تنش غیرزیستی را تنظیم می‌کنند (وادت^{۱۶} و همکاران، ۲۰۲۲). پیش‌تیمار با اسیدسالیسیلیک تحمل به شوری بالا در گیاه گندم

¹Mohamed²Moghaddam³Gholinezhad⁴Guo⁵Hossen⁶Hasanuzzaman⁷Papan⁸Saadat⁹Albaji and Marashi¹⁰Van Zelm¹¹Rhaman¹²Piri¹³Alhammad¹⁴Abdi¹⁵Tania¹⁶Waadt

ایجاد می کند (ال-هاواری^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات مطالعات اخیر نشان داد که تیمارهای مختلف هورمون پیش تیمار از جمله اسید سالیسیلیک باعث افزایش شاخص های جوانه زنی، شاخص های رشد و آنزیم های آنتی اکسیدانت از جمله کاتالاز در گیاه لوبیا می شود (سعادت و صدقی^۲، ۲۰۲۱). همچنین، گزارش شده است که پیش تیمار با اسید سالیسیلیک درصد جوانه زنی را در گندم افزایش می دهد (محمد و همکاران، ۲۰۱۹). شوری مانع اصلی برای تولید محصول است. پیش تیمار بذر می تواند به طور موثر تحمل شوری را ایجاد کند. گندم یکی از محصولات عمده غلات در جهان است و شوری رشد و عملکرد گیاهچه گندم را به شدت کاهش می دهد. بنابراین، هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پیش تیمار بذر با آب مقطر و مقادیر مختلف اسید سالیسیلیک روی خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه گندم در کاهش تاثیرات منفی شوری روی رشد گیاه است.

مواد و روش ها

به این منظور آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۳ با ۳ تکرار و چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی مولار) (عبدی و همکاران، ۲۰۲۲) و چهار سطح اسید سالیسیلیک (صفر (آب مقطر)، ۰/۱، ۱ و ۲ میلی مولار) انجام شد. بذرهای گندم نان رقم سائین طبقه بذر گواهی شده تولید ۱۴۰۲ از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. ابتدا بذرهای درون محلول های پیش تیمار و آب مقطر به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس غوطه ور شدند. بعد از پیش تیمار، بذرهای به وسیله آب مقطر شستشو و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس خشک گردیدند. سپس، ۲۵ عدد بذر درون هر پتری جهت کشت قرار گرفت، و به هر پتری محلول شوری (کلرید سدیم برند مرک) با غلظت های مختلف براساس میزان سطوح شوری در تیمارها به مقدار ۶ میلی لیتر اضافه گردید. سپس، پتری ها در داخل ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه

سلسیوس به مدت ۸ روز قرار داده شد. معیار جوانه زنی یک بذر، خروج ریشه چه به میزان ۲ میلی متر از پوسته بذر در نظر گرفته شد. برای محاسبه درصد جوانه زنی از رابطه ۱ (امیدی^۳ و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شد.

$$\text{رابطه ۱} \quad GP^4 = (n \times 100) / N$$

n: تعداد بذر جوانه زده، N: تعداد کل بذرهای

جهت تعیین فعالیت آنزیم های پاداکسیدانت در گندم، گیاهچه ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در داخل پتری درون ژرمیناتور به مدت ۸ روز رشد داده شدند و پس از باز شدن برگ های اولیه از هر تیمار پنج گیاهچه به تصادف انتخاب و بعد از قرار دادن در فویل آلومینیومی، به فریزر با دمای -۷۲ درجه منتقل گردیدند. به منظور 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 میلی لیتر از بافر فسفات سرد (pH=۷/۵) حاوی ۰/۵ میلی مولار EDTA به هاون افزوده شد. سپس، هموژن ها به اپندورف های ۲ میلی لیتری منتقل و به مدت ۱۵ دقیقه با دمای ۴ درجه سلسیوس در ۱۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ شدند. تمامی مراحل در روند تهیه عصاره آنزیمی در دمای ۴-۱ درجه سلسیوس انجام گرفت. جهت پیشگیری از انجماد و ذوب متوالی نمونه ها، سوپرناتانت حاصل به سه قسمت تقسیم شد و تا زمان اندازه گیری آنزیم های پاداکسیدانت در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند (سایرام^۵ و همکاران، ۲۰۰۲).

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز: فعالیت آنزیم

کاتالاز طبق روش (ابی^۶، ۱۹۸۴) اندازه گیری گردید. مواد شیمیایی مورد نیاز شامل ۰/۵ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۷/۵ میلی مولار، ۱/۵ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (pH=۷) و ۵۰ میکرو لیتر عصاره آنزیمی بود که حجم نمونه ها با افزودن آب مقطر به ۳ میلی لیتر رسانده شد. با افزودن پراکسید هیدروژن

³Omidi

⁴Germination percentage

⁵Sairam

⁶Aebi

¹El-Hawary

²Saadat and Sedghi

سنجش قندهای محلول: میزان قندهای محلول

به روش فنل سولفوریک (کوچرت^۳، ۱۹۷۸) و براساس هیدرولیز اسیدی قندهای محلول و ایجاد ترکیب فورفورال که با فنل تولید یک کمپلکس رنگی می‌کند، اندازه‌گیری شد. در این روش، ۰/۵ گرم از ریشه‌چه با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر به‌وسیله هاون له گردید. پس از صاف کردن، از عصاره گیاهی حاصل ۲ میلی‌لیتر برداشته شد و بعد از افزودن ۱ میلی‌لیتر فنل (۵٪ وزنی-حجمی) و ۳ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۸٪، لوله‌ها به مدت ۱ ساعت به حال خود رها شدند تا رنگ ظاهر و تثبیت شود. پس از ظهور رنگ، میزان جذب در طول موج ۴۸۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و با استفاده از منحنی استاندارد قند گلوکز، میزان قند در ریشه‌چه تحت تیمار بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. برای رسم شکل‌ها از نرم افزار Excel 2018 استفاده شد.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد

که اثر ساده اسید سالیسیلیک و شوری روی درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی (۹۰/۵ درصد) در پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار و کم‌ترین درصد جوانه‌زنی (۸۳/۷ درصد) در شاهد (آب مقطر) مشاهده گردید (جدول ۲). البته پرایمینگ با آب مقطر و اسید سالیسیلیک ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار اثر قابل توجهی روی این صفات گذاشت، اما تاثیر اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار بیشتر از آب مقطر و اسید سالیسیلیک ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بود.

واکنش شروع گردید و تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت شد. محلول جذب زمینه برای دستگاه شامل تمام موارد استفاده شده به جز عصاره آنزیمی استخراج شده بود. میزان پراکسید هیدروژن تجزیه شده با استفاده از ضریب خاموشی ($\epsilon = 39.4 \mu\text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$) محاسبه و فعالیت آنزیم کاتالاز بر اساس میکرومول پراکسید هیدروژن تجزیه شده در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین بیان گردید.

سنجش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز: مطابق روش

دومان^۱، (۲۰۰۶) فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز اندازه‌گیری شد. بذرهای در بافر فسفات ۶۰ میلی‌مولار (pH=۶/۸) هموژنیزه و سپس در ۱۲۰۰۰g و به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. فعالیت آنزیم در محیط واکنش که حاوی ۶۰ میلی‌مولار بافر فسفات (pH= ۶/۸)، ۴۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر کلسیم کلراید و ۵۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر نشاسته بود، مشخص شد. عصاره آنزیم (یک میلی‌لیتر) پس از ۲۰ دقیقه خوابانیدن در حمام آب گرم به محیط آزمایش اضافه شد. فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز با استفاده از نشاسته و با طول موج ۶۲۰ نانومتر به صورت میلی‌گرم مالتوز بر گرم وزن تر بذر در دقیقه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مشخص شد.

سنجش میزان پرولین: سنجش میزان پرولین

براساس روش بیتس^۲ و همکاران (۱۹۷۳) انجام گردید. در این روش ۰/۵ گرم از ریشه‌چه با ۵ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالیسیلیک له گردید. پس از صاف کردن با صافی از مخلوط همگن حاصل، ۲ میلی‌لیتر برداشته شد و بعد از اضافه کردن ۲ میلی‌لیتر معرف اسید نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک خالص در بن‌ماری به مدت یک ساعت با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس نمونه‌ها به حمام آب یخ منتقل و بعد از اضافه کردن ۴ میلی‌لیتر تولوئن، مقدار جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار پرولین با استفاده از منحنی استاندارد پرولین و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه به دست آمد.

³Kochert

¹Duman

²Bates

سعادت و صدقی: تأثیر پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک روی جوانه زنی و صفات بیوشیمیایی گیاهچه گندم نان....

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر اسید سالیسیلیک و شوری روی صفات مورد مطالعه در گیاهچه گندم

Tabel 1. Analysis of variance for the effect of salicylic acid and salinity on studied traits in wheat seedling

میانگین مربعات Mean of square						
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی .DF	درصد جوانه زنی Germination percentage	فعالیت کاتالاز Catalase	آلفا آمیلاز α Amylase	محتوای پروکلین Proline	محتوای قندهای محلول Soluble Sugars
پیش تیمار با اسید سالیسیلیک Priming by salicylic acid (SA)	3	124**	455**	8.55**	0.0447**	1309**
شوری Salinity (S)	3	522**	94.2**	7.12**	0.3855**	173**
اسید سالیسیلیک و شوری SA×S	9	6.80 ^{ns}	33.3*	0.588**	0.0080 ^{ns}	5.49 ^{ns}
خطا Error (E)	30	8.95	14.9	0.172	0.0074	8.22
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		3.37	14.8	19.5	21.8	6.61

^{ns}, * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱
ns, * and ** indicating not significant, the significant differences at 5 and 1 percent probability level

جدول ۲. مقایسه میانگین تأثیر اسید سالیسیلیک و شوری روی صفات مطالعه شده در گندم

Tabel 2. Mean comparison for the effect of salicylic acid and salinity on studied traits in wheat

تیمارها Treatments	درصد جوانه زنی Germination percentage	محتوای پروکلین Proline (mg g ⁻¹ FW)	محتوای قندهای محلول Soluble Sugars (mg g ⁻¹ FW)
پیش تیمار با آب مقطر Hydropriming	83.7 ^b	0.365 ^{bc}	31.9 ^d
پیش تیمار با اسید سالیسیلیک ۰/۱ (میلی مولار) Priming by salicylic acid 0.1(mM)	90.2 ^a	0.328 ^c	38.4 ^c
پیش تیمار با اسید سالیسیلیک ۰/۵ (میلی مولار) Priming by salicylic acid 0.5 (mM)	89.5 ^a	0.410 ^{ab}	46.9 ^b
اسید سالیسیلیک ۱ (میلی مولار) Priming by salicylic acid 1(mM)	90.5 ^a	0.470 ^a	56.0 ^a
شوری (میلی مولار) Salinity (mM)			
0	95.7 ^a	0.203 ^d	39.1 ^c
50	91.6 ^b	0.300 ^c	41.4 ^c
100	86.1 ^c	0.462 ^b	45.1 ^b
200	80.5 ^d	0.610 ^a	47.6 ^a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد است.
The different letters in each column indicate a significant difference at 5% probability level.

توانست روی فعالیت آنزیم کاتالاز تاثیر بگذارد، اما تاثیر اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار بیشتر از اسید سالیسیلیک ۰/۵، ۰/۱ میلی‌مولار و هیدروپرایمینگ بود. همچنین، با افزایش سطوح شوری فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۴۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار و با شوری ۲۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد و کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز (۱۷/۷ میکرومول پراکسید هیدروژن تجزیه شده در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در شاهد (آب مقطر) و بدون شوری مشاهده شد (شکل ۱a).

آنزیم‌های پاداکسیدانت نقشی اساسی در مهار گونه‌های فعال اکسیژن دارند. هنگامی که گیاهان در معرض شوری قرار می‌گیرند، گونه‌های فعال اکسیژن به‌ویژه در میتوکندری و کلروپلاست تولید می‌شوند (منصور^۶ و همکاران، ۲۰۲۲؛ کوهلی^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). گونه‌های فعال اکسیژن بسیار مضر بوده و سبب آسیب سلولی، پراکسیداسیون لیپیدی، اکسیداسیون پروتئین و تخریب اسید نوکلئیک می‌شود (کوهلی و همکاران، ۲۰۱۹). برای مقابله با اثرات مضر گونه‌های فعال اکسیژن یک سامانه دفاعی پاداکسیدانتی قوی شامل اجزای آنزیمی مانند کاتالاز ضروری است (افروز^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). در مطالعه ما، افزایش قابل توجهی در فعالیت آنزیم کاتالاز، در گیاهچه‌های گندم در معرض تنش شوری مشاهده شد. این افزایش را می‌توان به واکنش گیاهان به تنش شوری نسبت داد. افزایش در فعالیت کاتالاز، می‌تواند به‌طور بالقوه به سم‌زدایی سوپراکسید و پراکسید هیدروژن ناشی از تنش شوری در گیاهچه‌های گندم کمک کند. در واقع، تنش شوری، بیوسنتز پراکسید هیدروژن را که پایه و اساس انقباض سلولی، تجزیه DNA و کوتاه شدن کروماتین است، را افزایش می‌دهد (جونگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۲). پاداکسیدانت‌های آنزیمی با حذف سطح بالاتر پراکسید هیدروژن به کاهش تنش کمک می‌کنند (دانوچی^{۱۰} و

مقدار درصد جوانه‌زنی با تشدید شوری کاهش یافتند. به‌طوری‌که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی (۹۵/۷ درصد) در شاهد (بدون شوری) و کم‌ترین درصد جوانه‌زنی (۸۰/۵ درصد) در شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بود (جدول ۲).

تنش شوری از طریق کاهش فعالیت‌های متابولیکی مورد نیاز، جوانه‌زنی بذر را کاهش داده و روند جوانه‌زنی را به تأخیر می‌اندازد (دباز^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). در حقیقت، شوری با محدودیت جذب آب، پتانسیل آبی را کاهش داده و با افزایش تجمع بالای کلرید سدیم، درصد جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (فاضلی نسب^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). یون‌های سدیم و کلر اضافی جذب شده موجب سمیت یونی شده و از طریق تنفس و هیدرولیز مواد مغذی بر فرآیندهای متابولیکی بذر تأثیر می‌گذارد (مواندو^۳ و همکاران، ۲۰۲۰؛ نصیر^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، پیش‌تیمار بذر با اسید سالیسیلیک موجب فعال‌سازی آنزیم‌ها به‌ویژه آلفا آمیلاز در جنین شد و علاوه بر آن موجب افزایش آنزیم‌های پاداکسیدانتی از جمله آنزیم کاتالاز شد، این آنزیم‌ها فعالیت پراکسیداسیون لیپیدها طی تنش شوری کاهش داده و موجب افزایش درصد جوانه‌زنی می‌شود. در واقع، پیش‌تیمار بذر با فعال کردن برخی آنزیم‌ها در بذر درصد جوانه‌زنی افزایش داده و دسترسی به مواد مغذی را راحت‌تر می‌کند، در نهایت بذره‌ای پرایم شده سریع‌تر جوانه زده و تنش را تحمل می‌کند (بهراسیمانی^۵ و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج این تحقیق با نتایج سعادت و همکاران (۲۰۲۳b؛ ۲۰۲۳a) در راستای کاهش درصد جوانه‌زنی تحت شرایط تنش شوری در گیاه لوبیا مطابقت دارد.

فعالیت آنزیم کاتالاز: در این تحقیق، اثر ساده

اسید سالیسیلیک و شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). پرایمینگ با آب مقطر، اسید سالیسیلیک ۰/۵ و ۰/۱ میلی‌مولار

⁶Mansoor

⁷Kohli

⁸Afrouz

⁹Jeong

¹⁰Danouche

¹Debez

²Fazeli-Nasab

³Mwando

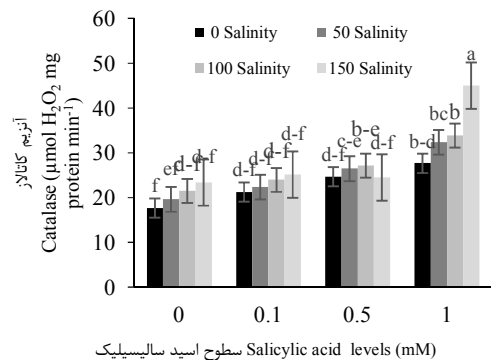
⁴Naseer

⁵Bahrasemani

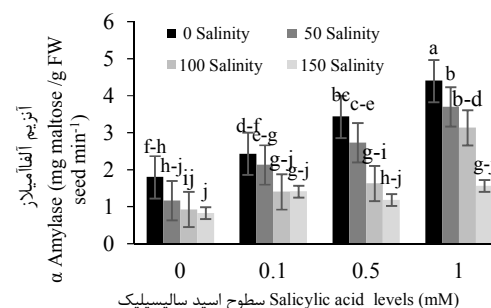
به عنوان پاداکسیدان عمل کرده، با فعال نمودن و افزایش آنزیم‌های پاداکسیدانت، گونه‌های فعال اکسیژن حاصل از تنش اکسیداتیو را از بین برده و از سلول پاک می‌کند (موتلو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک نشان می‌دهد که این اسید به درون بذر انتقال یافته و باعث فعال شدن برخی از فرآیندهای مرتبط می‌شود. بذرهای پرایم شده با اسید سالیسیلیک ممکن است بتوانند با کاهش سطح گونه‌های فعال اکسیژن برای القاء پاسخ پیامرسانی به عوامل ایجادکننده تنش اکسیداتیو مجهز شوند (گالویز فاجاردو^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). محققان نشان داده‌اند که پیش تیمار می‌تواند آسیب‌ها را از طریق تشکیل زیر واحدهای کاتالاز در سیتوپلاسم جبران کرده و سنتر آن را کامل کند و شدت تنش اکسیداتیو را تا حدی با بهبود فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانت کاهش دهد (ایکسیا^۴ و همکاران، همکاران، ۲۰۱۵). گزارش‌ها نشان داده است که پیش تیمار تحت تنش فعالیت آنزیم کاتالاز را در گندم افزایش می‌دهد (تکریلدیز^۵ و همکاران، ۲۰۲۴).

فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اسید سالیسیلیک و شوری و برهمکنش آن‌ها بر فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). هم‌چنین مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز (۴/۴۰ میلی گرم مالتوز بر گرم وزن تر بذر در دقیقه) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱ میلی مولار و بدون شوری و کم‌ترین مقدار فعالیت این آنزیم (۰/۸۳۰ میلی گرم مالتوز بر گرم وزن تر بذر در دقیقه) در شاهد (آب مقطر) و شوری ۲۰۰ میلی مولار بود (شکل ۱b).

تنش شوری فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز را با تجمع سدیم و کلر و تخریب غشای سلولی کاهش می‌دهد. کاهش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز تأثیر منفی بر فعالیت‌های آنزیمی و جوانه زنی بذر دارد و در نهایت موجب تأخیر در جوانه زنی و کاهش رشد گندم می‌شود (مرادی و پیری^۶، ۲۰۱۸). هم‌چنین، تنش شوری با



الف A



ب B

شکل ۱. اثر متقابل اسید سالیسیلیک و شوری برای فعالیت آنزیم کاتالاز (الف) و آلفا آمیلاز (ب) در گندم. حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 1. Interaction of salicylic acid and salinity for catalase and alpha amylase (B) in wheat; The different letters indicate significant differences at 5% probability level.

همکاران، ۲۰۲۰). در این مطالعه افزایش آشکاری در فعالیت آنزیم کاتالاز مشاهده شد که نشان دهنده پتانسیل ایجاد سازوکارهایی برای کاهش شوری است. مطالعات قبلی هم‌چنین، تغییرات در فعالیت آنزیم کاتالاز را در گیاه برنج در معرض تنش شوری گزارش کرده‌اند (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳a). گیاهان با متعادل کردن یون‌ها، فعال کردن سازوکارهای دفاعی پاداکسیدانتی، ایجاد انواع فیتوهورمون‌ها و محافظت کننده‌های اسمزی، تنش اسمزی حاصل از شوری را پاسخ می‌دهند. این سازگاری‌ها، سمیت یونی و آسیب گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داده و در نتیجه گیاهان را از پیامدهای منفی تنش اسمزی محافظت می‌کند (راضا^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). اسید سالیسیلیک به

^۱Raza^۲Mutlu^۳Galviz-Fajardo^۴Xia^۵Teker Yildiz^۶Moradi and Piri

کاهش فعالیت آلفا آمیلاز در بذر گیاهان موجب کاهش تشکیل گلوکز از نشاسته شده و با کاهش ساخته شدن ساکارز موجب محدود شدن محور جنینی‌زا و محدودیت رشد گیاهچه می‌شود (مهرابی اولادی^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). در حقیقت، کاهش فعالیت آلفا آمیلاز تحت تنش شوری موجب کاهش متابولیسم ذخایر غذایی بذر و کاهش رشد گیاهچه می‌شود (دخیل و دندن^۲، یکی از اثرات پیش‌تیمار، افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز است، از آنجایی‌که، این آنزیم مسئول تجزیه کربوهیدرات‌های ذخیره شده است، پس افزایش این آنزیم ترکیبات سرشار از انرژی ضروری را برای جوانه‌زنی افزایش می‌دهد (لی^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز طی پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک در شرایط تنش شوری توسط سجودی^۴ و همکاران (۲۰۱۴) روی ذرت گزارش شده است. نتایج پژوهشی نشان داد که میزان آلفا آمیلاز تحت تنش شوری در گیاهچه برنج افزایش یافت (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳a).

پرولین: طبق جدول تجزیه واریانس اثر اسید سالیسیلیک و تنش شوری بر پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و برهمکنش آن‌ها غیر معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین مقدار پرولین (۰/۴۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار بود. البته پرایمینگ با آب مقطر و سطوح دیگر اسید سالیسیلیک نیز روی پرولین تاثیر داشت، و کم‌ترین مقدار پرولین (۰/۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شاهد (آب مقطر) بود. با افزایش سطوح شوری مقدار پرولین افزایش یافت. به‌طوری‌که، بیش‌ترین مقدار پرولین (۰/۶۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شوری ۲۰۰ میلی‌مولار به‌دست آمد.

در پاسخ به تنش شوری، گیاهان سازوکارهای سازگاری مختلفی را برای کاهش اثرات آن نشان می‌دهند. این سازوکارها شامل سنتز محافظت کننده‌های اسمزی از جمله پرولین، که به بهبود جذب

آب کمک می‌کند و برای به حداقل رساندن آسیب اکسیداتیو، آنزیم‌های پاداکسیدانت را فعال می‌کند (عبدالعال^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ محی‌اودین^۶ و همکاران، همکاران، ۲۰۲۱). پرولین یک نشانگر زیستی تنش است که به عنوان یک اسمولیت برای حفظ یکپارچگی سلولی و از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کند (کاتور^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). خواص ساختاری منحصر به‌فرد پرولین و توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی، آن را در حفظ یکپارچگی ساختاری زیست مولکول‌ها ارزشمند می‌کند (شفیع^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). افزایش پرولین آسیب غشا و پراکسیداسیون لیپیدی ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می‌دهد (یجاز^۹ و همکاران، ۲۰۲۰). در این مطالعه، کاربرد آب مقطر و سطوح مختلف اسید سالیسیلیک اثر منفی شوری بر رشد گیاه گندم را کاهش داده و تجمع پرولین را افزایش داد. این می‌تواند به دلیل تعادل یونی در نتیجه پایداری غشای سلولی در یکپارچگی مثبت بین عناصر سدیم و سایر مواد مغذی باشد (روشدی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). از علل دیگر، افزایش پرولین طی پیش‌تیمار می‌توان به کاهش ساخت پروتئین، افزایش ساخت پرولین از گلوتامات یا اورنیتین، کاهش تخریب پرولین و افزایش آنزیم‌های هیدرولیزکننده پروتئین اشاره کرد (ترابیه و ایل-ایریان^{۱۱}، ۲۰۲۰؛ گوتز^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۸). گزارش شده است که محتوای پرولین در گیاهان نخود به موازات افزایش تنش شوری افزایش می‌یابد (نورین^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۴).

پرولین از طریق تثبیت غشاها و پروتئین‌ها، پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن، حفظ تعادل ردوکس سلولی و تنظیم پتانسیل اسمزی باعث افزایش تحمل گیاه به تنش می‌شود (قوش^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۹).

⁵Abdelaal⁶Mohi-Ud-Din⁷Kaur⁸Shafi⁹Ejaz¹⁰Roshdy¹¹Tarabih and El-Eryan¹²Go'tz¹³Noreen¹⁴Ghosh¹Mehrabi Oladi²Dkhil and Denden³Li⁴Sojoodi

قندهای محلول: در این تحقیق، اثر اسید سالیسیلیک و تنش شوری بر محتوای قندهای محلول در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین محتوای قندهای محلول (۵۶/۰۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار با اسید سالیسیلیک ۱ میلی مولار و کمترین آن (۳۱/۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) در شاهد بود. البته پرایمینگ با اسید سالیسیلیک ۰/۵، ۰/۱ میلی مولار و هیدروپرایمینگ اثر قابل توجهی بر محتوای قندهای محلول گذاشتند، اما تأثیر اسید سالیسیلیک ۱ میلی مولار بیشتر از اسید سالیسیلیک ۰/۵، ۰/۱ میلی مولار و هیدروپرایمینگ بود (جدول ۲). با افزایش شوری محتوای قندهای محلول افزایش یافت. به طوری که، بیشترین محتوای قندهای محلول (۴۷/۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) در شوری ۲۰۰ میلی مولار و کمترین (۳۹/۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) آن در شاهد (بدون شوری) مشاهده شد (جدول ۲).

تجمع قندهای محلول، یک راهبرد کارآمد برای گیاهان برای مقابله با تنش اسمزی است (شابالا^۱، ۲۰۱۳). در این تحقیق، شوری موجب افزایش میزان قندهای محلول تحت تیمار با اسید سالیسیلیک گردید. استفاده از اسید سالیسیلیک جهت شکل گیری ساختارهای سلولی جدید، مصرف متابولیک قندهای محلول را فعال می سازد که خود به عنوان سازوکاری جهت تحریک رشد و افزایش تجمع پرولین و کاهش اثرات منفی تنش شوری می شود (جعفری^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). علت تجمع قندهای محلول در طول تنش شوری تحت تیمار با اسید سالیسیلیک ممکن است، نتیجه فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز باشد که ناشاسته را تجزیه می کند تا پتانسیل اسمزی حفظ گردد (کوواسیک^۳ و همکاران، ۲۰۰۹). اسید سالیسیلیک در شرایط تنش با افزایش قندهای محلول، تنظیم اسمزی و حفظ پتانسیل آب سلول سبب کاهش اثرات منفی تنش شوری روی گیاهان می شود. قندهای محلول به عنوان یک منبع انرژی در طول تنش شوری عمل کرده و با غلبه بر اختلال متابولیسم سلولی سبب حفظ رشد

گیاهچه می شود. با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک، تغییرات فراساختاری در اندامک های سلولی مانند تونوپلاست و آنزیم های مسیر متابولیسم قندها ایجاد می شود و این یک نوع سازوکار تطابقی و سازگار یافته جهت حفظ و نگهداری پتانسیل اسمزی تحت تیمار اسید سالیسیلیک می باشد. تحقیقات نشان داده است با افزایش سطوح شوری قندهای محلول در گیاه کدو تنبل افزایش می یابد (موسوی^۴ و همکاران، ۲۰۲۱) که با نتایج نتایج مشاهده شده در این آزمایش مشابه بود.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش تنش شوری درصد جوانه زنی به طور معنی دار کاهش یافتند. تیمار با آب مقطر و اسید سالیسیلیک ۰/۱ و ۰/۵ میلی مولار، شاخص های جوانه زنی را تحت تنش شوری در گندم افزایش داد، اما تأثیر پیش تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار بیشتر بود. همچنین، اعمال پیش تیمار با آب مقطر و اسید سالیسیلیک ۰/۱ و ۰/۵ میلی مولار به ویژه پیش تیمار با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار فعالیت آنزیم کاتالاز، آلفا آمیلاز، پرولین و قندهای محلول را در بذره های تحت تنش شوری گندم بهبود بخشید. در نهایت، پیش تیمار بذر با اسید سالیسیلیک یک میلی مولار می تواند راهکاری مناسب برای کاهش اثر منفی شوری در گیاه گندم سائین باشد.

¹Shabala

²Jafari

³Kovacik

⁴Mousavi

منابع

- Abdelaal, K., Alsubeie, M.S., Hafez, Y., Emeran, A., Moghanm, F., Okasha, S., Omara, R., Basahi, M.A., Darwish, D.B.E. and Ibrahim, M.F.M. 2022. Physiological and biochemical changes in vegetable and field crops under drought, salinity and weeds stresses: Control strategies and management. *Agriculture*, 12: 2084. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122084>
- Abdi, N., Van Biljon, A., Steyn, C. and Labuschagne, M.T. 2022. Salicylic acid improves growth and physiological attributes and salt tolerance differentially in two bread wheat cultivars. *Plants*, 11: 1853. <https://doi.org/10.3390/plants11141853>
- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105: 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Afrouz, M., Sayyed, R.Z., Fazeli-Nasab, B., Piri, R., Almalki, W.H. and Fitriatin, B.N. 2023. Seed bio-priming with beneficial *Trichoderma harzianum* alleviates cold stress in maize. *PeerJ*, 11: e15644. <https://doi.org/10.7717/peerj.15644>
- Albaji, Z. and Marashi, S.K. 2024. Effect of seed priming with hydrogen peroxide on germination indices and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress condition. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 12(4): 57-67. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijssst.2023.361399.1476>
- Alhammad, B.A., Ahmad, A., Seleiman, M.F. and Tola, E. 2023. Seed priming with nanoparticles and 24-epibrassinolide improved seed germination and enzymatic performance of *Zea mays* L. in salt-stressed soil. *Plants*, 12: 690. <https://doi.org/10.3390/plants12040690>
- Bahrasemani, S., Seyedi, A., Fathi, S. H. and Jowkar, M. 2024. The seed priming using putrescine improves, germination indices and seedlings morphobiochemical responses of indigo (*Indigofera tinctoria*) under salinity stress. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 13(1): 179-188. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2023.128870>
- Bates, L.S., Waldern, R.P. and Tear, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Danouche, M., El Ghachtouli, N., El Baouchi, A. and El Arroussi, H. 2020. Heavy metals phytoremediation using tolerant green microalgae: enzymatic and nonenzymatic antioxidant systems for the management of oxidative stress. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (5): 104460. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104460>
- Debez, A., Ben Slimen, I.D., Bousselmi, S., Atia, A., Farhat, N., El Kahoui, S. and Abdelly, C. 2020. Comparative analysis of salt impact on sea barley from semi-arid habitats in Tunisia and cultivated barley with special emphasis on reserve mobilization and stress recovery aptitude. *Plant Biosystems*, 154: 544-552. <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1651777>
- Dkhil, B.B. and Denden, M. 2010. Salt stress induced changes in germination, sugars, starch and enzyme of carbohydrate metabolism in *Abelmoschus esculentus* L. (Moench.) Seeds. *African Journal of Agricultural Research*, 5: 1412-1418.
- Duman, I. 2006. Effect of seed priming with PEG and K3PO4 on germination and seedling growth in lettuce. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9(5): 923-928. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2006.923.928>
- Ejaz, S., Fahad, S., Anjum, M.A., Nawaz, A., Naz, S., Hussain, S. and Ahmad, S. 2020. Role of osmolytes in the mechanisms of antioxidant defense of plants. *Sustainable Agriculture Reviews*, 39: 95-117. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38881-2_4
- El-Hawary, M.M., Hashem, O.S.M. and Hasanuzzaman, M. 2023. Seed priming and foliar application with ascorbic acid and salicylic acid mitigate salt stress in wheat. *Agronomy*, 13: 493. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020493>

- Farhoudi, R. and Khodarahmpour, Z. 2017. Study of germination, seedling growth and antioxidant enzymes activity of chickpea cultivars under salt stress. *Plant Process and Function*, 6(21): 91-102. [In Persian]
- Fazeli-Nasab, B., Khajeh, H., Piri, R. and Moradian, Z. 2023. Effect of humic acid on germination characteristics of *Lallemantia royleana* and *Cyamopsis tetragonoloba* under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 9(2): 51-62. [In Persian] <https://doi.org/10.61186/yujs.9.2.51>
- Galviz-Fajardo, Y.C., Bortolin, G.S., Deuner, S., Amarante, L.d., Reolon, F. and Moraes, D.M.D. 2020. Seed priming with salicylic acid potentiates water restriction-induced effects in tomato seed germination and early seedling growth. *Journal of Seed Science*, 42: e202042031. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42234256>
- Gholinezhad, E. 2014. The effects of salinity stress on related germination traits of wheat genotypes. *Journal of Plant Research*, 27(2): 276-287. [In Persian]
- Ghosh, U.K., Islam, M.N., Siddiqui, M.N., Cao, X. and Khan, M.A.R. 2022. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. *Journal of Plant Biology*, 24: 227-239. <https://doi.org/10.1111/plb.13363>
- Goetz, F., Longnecker, K., Kido Soule, M.C, Becker, K.W., McNichol, J. and Kujawinski, E.B. 2018. Targeted metabolomics reveals proline as a major osmolyte in the chemolithoautotroph *Sulfurimonas denitrificans*. *Microbiologyopen*, 7: e00586. <https://doi.org/10.1002/mbo3.586>
- Guo, J., Du, M., Tian, H. and Wang, B. 2020. Exposure to high salinity during seed development markedly enhances seedling emergence and fitness of the progeny of the extreme halophyte *Suaeda salsa*. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1291. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01291>
- Hasanuzzaman, M., Parvin, K., Bardhan, K., Nahar, K., Anee, T.I. and Masud, A.A.C. 2021. Biostimulants for the regulation of reactive oxygen species metabolism in plants under abiotic stress. *Cells*, 10: 2537. <https://doi.org/10.3390/cells10102537>
- Hossen, M.S., Karim, M.F., Fujita, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K. and Masud, A.A.C. 2022. Comparative physiology of Indica and Japonica rice under salinity and drought stress: an intrinsic study on osmotic adjustment, oxidative stress, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification. *Stresses*, 2: 156-178. <https://doi.org/10.3390/stresses2020012>
- Jafari, L., Yadavi, A., Movahedi Dehnavi, M., Balouchi, H. and Maghsoudi, E. 2018. The effect of ascorbic acid and salicylic acid on some physiological characteristics of safflower under salinity stress. *Plant Production Technology*, 10: 69-80. [In Persian]
- Jeong, M.J., Lim, D.S., Kim, S.O., Park, C., Leem, S.H. and Lee, H. 2022. Protection of oxidative stress-induced DNA damage and apoptosis by rosmarinic acid in Murine myoblast C₂C₁₂ cells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 27(2): 171-182. <https://doi.org/10.1007/s12257-021-0248-1>
- Kaur, H., Manna, M., Thakur, T., Gautam, V. and Salvi, P. 2021. Imperative role of sugar signaling and transport during drought stress responses in plants. *Physiologia Plantarum*, 171(4): 833-848. <https://doi.org/10.1111/ppl.13364>
- Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by phenol-sulfuric acid method. In: Hellebust, A., Craige, J.S. (eds.), *Physiological and Biochemical Methods*. Cambridge University Press, London, pp. 95-97.
- Kohli, S.K., Khanna, K., Bhardwaj, R., Abda Allaha, E.F., Ahmad, P. and Corpas, F.J. 2019. Assessment of subcellular ROS and NO metabolism in higher plants: Multifunctional signaling molecules. *Antioxidants*, 8(12): 641. <https://doi.org/10.3390/antiox8120641>
- Kovacik, J., Gruz, J., Backor, M., Strnad, M. and Repeck, M. J. 2009. Salicylic acid-induced changes to growth and phenolic metabolism in *Matricaria chamomilla* plants. *Plant Cell Reports*, 28(1): 135-143. <https://doi.org/10.1007/s00299-008-0627-5>

- Li, F., Li, T., Sun, C., Xia, J., Jiao, Y. and Xu, H. 2017. Selenium-doped carbon quantum dots for free-radical scavenging. *Angewandte Chemie International Edition*, 56: 9910-9914. <https://doi.org/10.1002/anie.201705989>
- Mansoor, S., Wani, O.A., Lone, J.F., Manhas, S., Kour, N., Alam, P. and Ahmad, P. 2022. Reactive oxygen species in plants: from source to sink. *Antioxidants*, 11(2): 225. <https://doi.org/10.3390/antiox11020225>
- Mehrabi Oladi, A.A., Omid, M. and Fazli Nasab, B. 2018. Investigating the effects of salinity stress on seed germination, seedling growth and callus cultivation of rapeseed genotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 42(1): 81-90. [In Persian]
- Moghaddam, H., Oveisi, M., Mehr, M.K., Bazrafshan, J., Naeimi, M.H., Kaleibar, B.P. and Müller-Schärer, H. 2023. Earlier sowing combined with nitrogen fertilization to adapt to climate change effects on yield of winter wheat in arid environments: Results from a field and modeling study. *European Journal of Agronomy*, 146: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126825>
- Mohamed, A.B., El-Banna, M.F., Farouk, S. and Khafagy, M. A. 2019. The role of grain priming and its duration on wheat germination and seedling growth. *Journal of Plant Production*, 10(4): 343-349. <https://doi.org/10.21608/jpp.2019.36267>
- Mohi-Ud-Din, M., Siddiqui, N., Rohman, M., Jagadish, S.K., Ahmed, J.U., Hassan, M.M., Hossain, A. and Islam, T. 2021. Physiological and biochemical dissection reveals a trade-off between antioxidant capacity and heat tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Antioxidants*, 10: 351. <https://doi.org/10.3390/antiox10030351>
- Moradi, A. and Piri, R. 2018. Enhancement of salinity stress tolerance in Cumin (*Cuminum cyminum* L.) as affected by plant growth promoting rhizobacteria during germination stage. *Journal of Plant Process and Function*, 6(22): 47-54. [In Persian]
- Mousavi, S.E., Omid, H., Saeedizadeh, A. and Aghighi Shahverdi, M. 2021. The effect of biological pretreatments on germination and physiological indices of pumpkin (*Cucurbita pepo* var. Styriaca) seedling under salt stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 7(2): 33-53. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/yujs.7.2.33>
- Mutlu, S., Atici, O. and Nalbantoglu, B. 2009. Effects of salicylic acid and salinity on apoplastic antioxidant enzymes in two wheat cultivars differing in salt tolerance. *Biological Plantarum*, 34: 334-338. <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0061-8>
- Mwando, E., Han, Y., Angessa, T.T., Zhou, G., Hill, C.B., Zhang, X.Q. and Li, C. 2020. Genome-wide association study of salinity tolerance during germination in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Frontiers in Plant Science*, 11: 118. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00118>
- Naseer, M.N., Rahman, F.U., Hussain, Z., Khan, I.A., Aslam, M.M., Aslam, A., Waheed, H., Khan, A.U. and Iqbal, S. 2022. Effect of salinity stress on germination, seedling growth, mineral uptake and chlorophyll contents of three cucurbitaceae species. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 65: 1-10. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210213>
- Noreen, S., Saleem, S., Iqbal, U., Mahmood, S., Akhter, S., Akbar, M.N., El-Sheikh, M. and Kaushik, P. 2024. Moringa olifera leaf extract increases physio-biochemical properties, growth and yield of *Pisum sativum* grown under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*, 36(2): 103056. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.103056>
- Omid, H., Naghdi Badi, H.A. and Jafarzadeh, L. 2015. Seeds of medicinal plants and crops. Shahed University Press. 454 p. [In Persian]
- Papan, P., Moezzi, A., Chorom, M., and Rahnema, A. 2022. Biochemical and physiological response of quinoa to application of different levels of nitrogen and salinity irrigation water. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15: 501-515. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/escs.2021.3846.1923>
- Piri, R., Moradi, A., Salehi, A. and Balouchi, H.R. 2021. Effect of seed biological pretreatments on germination and seedling growth of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(4): 11-26. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijss.2019.109182.1054>

- Raza, A., Charagh, S., Najafi-Kakavand, S., Abbas, S., Shoaib, Y. and Anwar, S. 2023. Role of phytohormones in regulating cold stress tolerance: physiological and molecular approaches for developing cold-smart crop plants. *Plant Stress*, 8: 100152. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100152>
- Rhaman, M.S., Imran, S., Rauf, F., Khatun, M., Baskin, C.C., Murata, Y. and Hasanuzzaman, M. 2021. Seed priming with phytohormones: An effective approach for the mitigation of abiotic stress. *Plants*, 10(1): 5772-5787. <https://doi.org/10.3390/plants10010037>
- Roshdy, A.E.D., Alebidi, A., Almutairi, K., Al-Obeed, R. and Elsabagh, A. 2021. The effect of salicylic acid on the performances of salt stressed strawberry plants, enzymes activity, and salt tolerance index. *Agronomy*, 11: 775. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040775>
- Saadat, H. and Sedghi, M. 2021. Effect of priming and aging on physiological, biochemical traits seed common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Seed Research*, 11(3): 75-89. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/jsr.2022.1945870.1228>
- Saadat, H., Soltani, E. and Sedghi, M. 2023a. The effect of seed priming with chitosan on germination characteristics and activity of antioxidant enzymes in rice seedlings (*Oryza Sativa* L.) under salinity stress. *Plant Process and Function*, 12(54): 239-258. [In Persian]
- Saadat, T., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R. and Farzaneh, S. 2023b. 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] <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](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9)
- Shabala, S. 2013. Learning from halophytes: Physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops. *Annals of Botany*, 112: 1209-1221. <https://doi.org/10.1093/aob/mct205>
- Shafi, A., Zahoor, I. and Mushtaq, U. 2019. Proline accumulation and oxidative stress: diverse roles and mechanism of tolerance and adaptation under salinity stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 8(30): 269-300. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8805-7_13
- Sojoodi, P., Oveysi, M. and Ghooshchi, F. 2014. Effect of pretreatment salicylic acid on germination and seedling growth in sweet corn (*Zea mays* L.) under salt stress conditions. *Iranian Journal of Dynamic Agriculture*, 10(4): 305-316. [In Persian]
- Tania, S.S., Rahaman, M., Rauf, F., Suborna, M.A., Kabir, M.H., Hoque, A. and Mohammad Saidur Rhaman, M.S. 2021. Seed priming with salicylic acid (SA) and hydrogen peroxide (H₂O₂) Improve germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*) under salt stress. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 6(4): 60-69. <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2021/v6i430127>
- Tarabih, M. and El-Eryan, E. 2020. Glycine betaine and proline with thinning technique for resistance abiotic stress of Cristalina cactus pear. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 23: 68-80. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.68.80>
- Teker Yıldız, M., Eda Günay, E. and Acar, O. 2024. Physiological and biochemical effects of thermo-priming on wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought and heat stresses. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 1: 375-389. <https://doi.org/10.29130/dubited.1213671>
- Van Zelm, E., Zhang, Y. and Testerink, C. 2020. Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71: 403-433. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>
- Waadt, R., Seller, C.A., Hsu, P.K., Takahashi, Y., Munemasa, S. and Schroeder, J.I. 2022. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23: 680-694. <https://doi.org/10.1038/s41580-022-00479-6>
- 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>