



<https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en>
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 3041-9603
Vol. 18, Issue 1, No. 67, 2026
Document Type: Research Paper
Received: 31/01/2026 Accepted: 09/05/2026

The Effect of Delayed Sowing Date (as a Cold Stress Inducer) and Seed Pre-treatment on Leaf Nutrient Concentration, Physiological Indices, and Wheat Yield

Esmaeil Gholinezhad¹, Saiedeh Salavati¹, Alireza Eivazi², Bakhtiar Lalehgani¹ 

¹ Department of Agricultural Sciences, Faculty of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

² Department of Agricultural Research and Natural Resources, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Urmia, Iran

Abstract

Late planting dates, due to the induction of cold stress, represent one of the most critical limiting factors for wheat production in cold and temperate regions, causing significant yield losses by disrupting physiological and nutritional processes. The use of seed pre-treatment with bio- and chemical stimulants has emerged as a promising strategy to mitigate the effects of this stress. This study aimed to evaluate the effects of planting date and various pre-treatment treatments on leaf nutrient concentrations, physiological indices, and grain yield of the Simin wheat cultivar. A factorial experiment was conducted within a randomized complete block design with three replications during the 2024–2025 growing season at the Urmia Agricultural Research Center. The first factor consisted of two planting dates (October 22 and December 22), and the second factor comprised seven pre-treatment treatments (control, salicylic acid, gibberellic acid, GABA, potassium nitrate, zinc sulfate, and melatonin). Measured traits included leaf nutrient concentrations, membrane stability index, calcium nutritional index, stress index, nutrient use efficiency, grain filling rate, and grain yield. Results showed that the second planting date reduced magnesium, calcium, and iron concentrations by 28%, 27%, and 19%, respectively. Furthermore, the interaction of planting date and seed pre-treatment with melatonin increased grain yield by 37% on the first planting date and 42% on the second planting date. Melatonin, GABA, and potassium nitrate treatments were significantly superior in improving physiological indices compared to other treatments. Overall, the first planting date combined with seed pre-treatment using melatonin, GABA, or potassium nitrate is recommended as the optimal management strategy to improve nutritional status, enhance cold tolerance, and achieve optimal yield of the Simin wheat cultivar under conditions similar to the study region. The choice of pre-treatment should be based on planting date and management objectives (improving nutrition or increasing stress tolerance).

Keywords: Cold stress, GABA, Grain yield, Melatonin, Nutrient elements, Seed pre-treatments, Wheat

*Corresponding Author: lalehgani@pnu.ac.ir



Introduction

Delayed sowing date is a major limiting factor for wheat production in cold and cold semi-arid regions, causing significant yield loss by disrupting physiological and nutritional processes. Cold stress, particularly during early growth stages, impairs root activity, reduces nutrient uptake and translocation, damages membrane integrity, and limits photosynthetic efficiency. In Iran, where large areas of wheat fields are located in cold semi-arid zones, autumn and early winter frosts annually cause substantial economic damage. Seed priming with biological and chemical stimulants is a pre-treatment approach to mitigate these adverse effects by enhancing germination, improving seedling vigor, and activating stress-responsive mechanisms. This study aimed to evaluate the impact of sowing date (optimal vs. delayed) and different seed pre-treatments on leaf nutrient concentration (magnesium, calcium, iron, zinc, potassium), physiological indices (membrane stability index, calcium nutrition index, stress index, element use efficiency, grain filling rate), and grain yield of Simin wheat, a cold-adapted bread wheat cultivar widely grown in Iran.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design with three replications during the 2024-2025 growing season at the Urmia Agricultural Research Center, West Azerbaijan Province, Iran (latitude 37°44' N, longitude 45°02' E, altitude 1352 m). The region has a cold semi-arid climate with average annual rainfall of 390 mm and a mean temperature of 11.3°C. Factors included two sowing dates (November 1 as optimal sowing, and December 1 as delayed sowing to induce cold stress) and seven seed pre-treatments: control (dry seed), salicylic acid (1 mM), gibberellic acid (1500 µM), GABA (10 mM), potassium nitrate (200 mM), zinc sulfate (50 mM), and melatonin (100 µM). Seeds were soaked in priming solutions for 15 hours, air-dried for 48 hours, and then sown by drill using a broadcast method at a density of 500 seeds m⁻². Standard agronomic practices, including four spring irrigations, were applied. Measured traits included leaf concentrations of Mg, Ca, Fe, Zn, and K; total leaf element concentration; membrane stability index (MSI); calcium nutrition index (NIC); stress index (SI); element use efficiency (EUE); grain filling rate (GFR); and grain yield (GY). Data were analyzed using SAS software (version 9.1), and means were compared using Tukey's HSD test at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion

Results indicated that the interaction between sowing date and seed pre-treatments was significant ($p \leq 0.01$) for leaf nutrient concentration, nutrient use efficiency, and grain filling rate. Delayed sowing (December 1) significantly reduced leaf concentrations of magnesium, calcium, and iron by 28%, 27%, and 19%, respectively, compared to optimal sowing (November 1). This reduction is primarily attributed to impaired root function, reduced transpiration-driven nutrient transport, and decreased metabolic activity under cold stress conditions experienced by late-sown plants during early growth stages. Furthermore, delayed sowing decreased the membrane stability index by approximately 9.5%, indicating greater electrolyte leakage and membrane damage.

Regarding seed pre-treatments, GABA, melatonin, and potassium nitrate were consistently superior in improving physiological indicators. Specifically, GABA increased leaf Mg by 30%, while melatonin and KNO₃ raised leaf Ca by 30% and 29%, respectively, compared to the control. All priming treatments significantly enhanced leaf Fe concentration, with GABA, salicylic acid, and melatonin showing up to 31% improvement. The interaction between sowing date and priming was significant for leaf Zn and K. Under optimal sowing, KNO₃ increased leaf Zn by 81%, whereas under delayed sowing, GABA was most effective (60% increase). For leaf K, KNO₃ (53% increase) and melatonin (26%) performed best in the first sowing date, while GABA (42%) and melatonin (33%) excelled under late sowing.

Compared to the unprimed control within each sowing date, melatonin increased grain yield by 37% in the first planting date and 42% in the second planting date compared to the unprimed control. GABA and KNO₃ also significantly enhanced grain yield, particularly under optimal and late sowing conditions, respectively. Melatonin consistently improved the calcium nutrition index (NIC), grain filling rate, and stress index (SI), highlighting its role as a broad-spectrum stress protectant. In general, early sowing combined with seed pre-treatment using melatonin, GABA, or potassium nitrate is recommended as the best management strategy to improve nutritional status, enhance cold tolerance, and achieve optimal yield in Simin wheat under similar regional conditions. The superior performance of melatonin is attributed to its dual role as a direct antioxidant and a signaling molecule that regulates stress-responsive genes, stabilizes membranes, and improves nutrient redistribution. GABA's effectiveness is linked to its role in reducing oxidative stress,

maintaining osmotic balance, and protecting photosynthetic pigments. Potassium nitrate likely acts through nutritional and osmotic regulation, improving K^+/Na^+ homeostasis and activating antioxidant enzymes.

The choice of seed pre-treatments should be aligned with the sowing date and management objectives (nutrition improvement vs. stress tolerance enhancement). For instance, KNO_3 is more suitable under near-optimal conditions to boost nutrient content, while GABA and melatonin are preferable under cold stress conditions to enhance physiological resilience and yield stability.

Conclusion

Early sowing combined with seed pre-treatment using melatonin, GABA, or potassium nitrate is recommended as the optimal management strategy to improve nutritional status, enhance cold tolerance, and achieve maximum yield in Simin wheat under similar regional conditions.

تأثیر تأخیر در تاریخ کاشت (به عنوان القاکننده تنش سرما) و پیش تیمار بذر بر غلظت عناصر غذایی برگ، شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد گندم

اسماعیل قلی نژاد^۱، سعیده صلواتی^۱، علیرضا عیوضی^۲، بختیار الله گانی^{۱*}

^۱گروه علوم کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲بخش تحقیقات نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

چکیده

تاریخ کاشت دیر هنگام به علت القای تنش سرما یکی از مهمترین عوامل محدودکننده تولید گندم در مناطق سرد و معتدله است که با اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک و تغذیه‌ای، خسارت قابل توجهی به عملکرد وارد می‌کند. استفاده از روش پیش تیمار بذر با محرک‌های زیستی و شیمیایی، به عنوان راهکاری امیدبخش برای تعدیل اثرات این تنش مطرح است. هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر تاریخ کاشت و تیمارهای مختلف پیش تیمار بر غلظت عناصر غذایی برگ، شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد دانه گندم رقم سیمین بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در مرکز تحقیقات کشاورزی ارومیه اجرا شد. فاکتور اول شامل دو تاریخ کاشت (اول آبان و اول دی) و فاکتور دوم هفت تیمار پیش تیمار (شاهد، سالیسیلیک اسید، جیرلیک اسید، گابا، نیترات پتاسیم، سولفات روی و ملاتونین) بود. صفات مورد اندازه‌گیری شامل غلظت عناصر غذایی برگ، شاخص پایداری غشاء، شاخص تغذیه‌ای کلسیم، شاخص تنش، کارایی مصرف عناصر، نرخ پر شدن دانه و عملکرد دانه بود. نتایج نشان داد تاریخ کاشت دوم، غلظت منیزیم، کلسیم و آهن را به ترتیب به میزان ۲۸، ۲۷ و ۱۹ درصد کاهش داد. همچنین بر همکشی تاریخ کاشت و پیش تیمار بذر با ملاتونین، عملکرد دانه را به ترتیب ۳۷ درصد در تاریخ کاشت اول و ۴۲ درصد در تاریخ کاشت دوم افزایش داد. تیمارهای ملاتونین، گابا و نیترات پتاسیم در بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک در مقایسه با سایر تیمارها برتری معنی‌داری داشتند. به طور کلی، تاریخ کاشت اول همراه با پیش تیمار بذر با ملاتونین، گابا یا نیترات پتاسیم، به عنوان بهترین راهکار مدیریتی برای بهبود وضعیت تغذیه‌ای، افزایش تحمل به سرما و دستیابی به عملکرد بهینه در گندم رقم سیمین در شرایط مشابه منطقه‌ای توصیه می‌شود. انتخاب تیمار پیش تیمار باید با توجه به تاریخ کاشت و اهداف مدیریتی (بهبود تغذیه یا افزایش تحمل به تنش) صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: گندم، تنش سرما، پیش تیمار بذر، ملاتونین، گابا، عناصر غذایی، عملکرد دانه.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی و منبع ضروری کالری و پروتئین در جهان است (Rathor et al., 2024). تولید جهانی گندم بیش از ۷۸۱ میلیون تن بوده و این بزرگترین سطح زیر کشت در جهان است (FAO, 2023). اهمیت گندم برای تغذیه انسان و مصرف خوراک دام، آن را به یک عامل حیاتی برای امنیت غذایی تبدیل می‌کند (Rathor et al., 2024). از سوی دیگر، بالغ بر ۹۰ درصد گندم تولیدی دنیا، به گندم نان و ۱۰ درصد به گندم دوروم اختصاص دارد (Martínez-Moreno et al., 2020). دمای پائین به عنوان شاخص اصلی در تعیین گسترش و پراکنش گیاهان محسوب می‌شود. سرما در زمره زیانبارترین عوامل خسارت‌زا در محصولات پائیزه به شمار می‌رود. ایران از جمله کشورهایی است که تنش سرما در مزارع غلات آن همواره مشکل اساسی در راه تولید محصول است. تعداد روزهای یخبندان در مناطق بسیار سرد بیش از صد روز و میانگین دمای هوا حداقل در طول فصل زمستان کمتر از ۱۵- درجه سانتی‌گراد است که عامل محدودکننده افزایش سطح کشت و تولید است (Roustaii, 2009). بر اساس آمار صندوق بیمه محصولات کشاورزی طی سال زراعی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۷ بالغ بر چهارصد و ده میلیارد ریال بابت خسارت سرمازدگی برای حدود ۱/۱۱ میلیون هکتار از مزارع گندم و جو تحت پوشش بیمه، به کشاورزان پرداخت شده است (Rasheed et al., 2022).

تنش سرما از جمله عوامل محدودکننده اصلی تولید محصولات کشاورزی در مناطق معتدله و سردسیر محسوب می‌شود. این تنش با ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، خسارات قابل توجهی به ویژه در مراحل اولیه رشد گیاهان وارد می‌نماید (Sanghera et al., 2011). در این راستا، استفاده از ترکیبات محرک مقاومت نظیر گاما آمینوبوتیریک اسید (GABA) به عنوان

یک راهکار امیدبخش جهت کاهش اثرات منفی تنش سرما مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Shelp et al., 2012).

پژوهش‌های متعدد نشان دادند گابا توسط سازوکارهای کلیدی متعددی مقاومت گیاهان به تنش سرما را افزایش می‌دهد. این ترکیب با تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی و افزایش فعالیت آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز، تنش اکسیداتیو ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می‌دهد (Malekzadeh et al., 2012). همچنین گابا با حفظ یکپارچگی غشای سلولی توسط کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و محتوای مالون‌دی‌آلدهید، از تخریب ساختار غشاء و نشت یونی جلوگیری می‌کند (Wang et al., 2014). از سوی دیگر، این ترکیب با القای تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین، در تنظیم تعادل آبی سلول نقش ایفا کرده و از دهیدراتاسیون تحت شرایط تنش جلوگیری می‌نماید (Krishnan et al., 2013). علاوه بر این، گابا با حفظ محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل و کاروتنوئید، کارایی دستگاه فتوسنتزی را در شرایط تنش دمایی بهبود می‌بخشد (Li et al., 2016).

در پژوهش بر روی گیاهچه‌های هندوانه، کاربرد گابا با غلظت ۱۰ میلی‌مولار و به روش محلول‌پاشی برگ‌ی، به طور معنی‌داری شاخص سرمازدگی را کاهش و محتوای نسبی آب برگ را افزایش داد (Omidi et al., 2024). در گیاه خیار، پیش‌تیمار بذر با گابا منجر به کاهش نشت یونی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش سرما شد (Saidi et al., 2020). سالیسیلیک اسید به عنوان یک هورمون گیاهی و پیام‌رسان در پاسخ به تنش‌های محیطی شناخته می‌شود. پژوهش‌ها نشان دادند استفاده از سالیسیلیک اسید می‌تواند به بهبود جوانه‌زنی، افزایش محتوای کلروفیل و بهبود صفات فیزیولوژیکی در گیاهان گندم کمک کند (Saeed et al., 2024). جیبرلیک اسید یکی دیگر از هورمون‌های گیاهی است که نقش مهمی در

و جیبرلیک اسید بر جوانه زنی و رشد ریشه در شرایط تنش سرمایی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این ترکیب‌ها می‌توانند به بهبود تحمل گیاه به تنش‌های محیطی و کاهش اثرات منفی سرمای دیررس بهاره کمک کنند (Khan et al., 2020). همچنین در پژوهش دیگری نشان داده شد که پیش تیمار با پتاسیم می‌تواند به بهبود عملکرد و کیفیت دانه در گندم در شرایط تنش دما و سرمای دیررس کمک کند و نیز تأثیر مثبتی بر صفات فیزیولوژیکی مانند محتوای کلروفیل و وزن هزار دانه داشته باشد (Ma et al., 2019).

با توجه به جایگاه حیاتی گندم در امنیت غذایی جهانی و واقع شدن بخش عمده‌ای از اراضی کشت آن در ایران در مناطق مستعد تنش سرما، کاهش عملکرد ناشی از سرمازدگی پائیزه و بهاره سالانه خسارات اقتصادی قابل توجهی را به بخش کشاورزی وارد می‌سازد. تنش سرما توسط اختلال در جذب و انتقال عناصر غذایی کلیدی مانند کلسیم، منیزیم و آهن، که نقش اساسی در حفظ ساختار غشاء، عملکرد فتوسنتز و تکمیل فرآیند پر شدن دانه دارند، عملکرد کیفی و کمی محصول را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، ارائه راهکارهای عملی و مقرون به صرفه برای افزایش تحمل به سرما ضروری به نظر می‌رسد. با وجود این، پیش تیمار بذر به عنوان یک فن ساده و کم هزینه، توسط ترکیبات مختلف، پتانسیل بالایی برای افزایش استقرار اولیه گیاهچه و بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیک در برابر تنش‌ها دارد. با این حال، پاسخ غلظت عناصر غذایی و شاخص‌های فیزیولوژیک گندم به کاربرد همزمان تاریخ کاشت (به عنوان عامل ایجاد تنش) و تیمارهای نوین پیش تیمار (نظیر ملاتونین و گابا) به‌طور جامع بررسی نشده است.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی تأثیر تأخیر در تاریخ کاشت (به عنوان القاکننده تنش سرما) و تیمارهای پیش تیمار با ترکیبات شیمیایی و زیست فعال بر وضعیت تغذیه‌ای برگ (با تأکید بر عناصر کلیدی)، شاخص‌های

رشد و توسعه گیاهان دارد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که جیبرلیک اسید می‌تواند به بهبود متابولیسم کربوهیدرات‌ها و افزایش ذخایر انرژی در گیاهان کمک کند که این امر بهبود عملکرد را به دنبال دارد (Pramanik, 2022). از سوی دیگر، نیترات پتاسیم به عنوان یک منبع نیتروژن و پتاسیم، نقش مهمی در رشد و توسعه گیاهان دارد. پژوهش‌ها نشان دادند استفاده از نیترات پتاسیم می‌تواند به بهبود جوانه زنی، افزایش تعداد سنبله و وزن دانه در گندم کمک کند (Vijayakumar et al., 2019).

روی به عنوان یک عنصر ریزمغذی، نقش مهمی در متابولیسم گیاهان دارد. پژوهش‌ها نشان دادند استفاده از سولفات روی می‌تواند به بهبود کیفیت دانه و افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی کمک کند (Ahmed et al., 2025).

ملاتونین به عنوان یک هورمون طبیعی در گیاهان شناخته می‌شود که نقش مهمی در تنظیم چرخه‌های خواب و بیداری و همچنین در پاسخ به تنش‌های محیطی دارد. پژوهش‌ها نشان دادند استفاده از ملاتونین می‌تواند به بهبود تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی، افزایش محتوای کلروفیل و بهبود عملکرد دانه در گندم کمک کند (Muhammad et al., 2024).

پژوهشگران در پژوهشی نشان دادند که پیش تیمار با سالیسیلیک اسید و نیترات پتاسیم به طور همزمان می‌تواند بهبود قابل توجهی در جوانه زنی و رشد اولیه گندم در شرایط تنش خشکی و سرمای دیررس بهاره ایجاد کند. این بررسی نشان داد که ترکیب این دو ماده می‌تواند به افزایش محتوای کلروفیل و کاهش تنش اکسیداتیو منجر شود (Tanin et al., 2023). در پژوهش دیگری در مورد اثرات پیش تیمار با سولفات روی بر روی گندم بیان شده است که این ترکیب به ویژه در شرایط تنش سرمای دیررس بهاره می‌تواند به بهبود وزن دانه، کیفیت نانویی و افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی در گیاهان گندم کمک کند (Rehman et al., 2022). پژوهشگران در پژوهش دیگر اثرات مثبت گابا

در هر مترمربع ۵۰۰ بذر در نظر گرفته شد. بذرها زمان کاشت در محلول‌های پیش‌تیمار به مدت ۱۵ ساعت خیس‌انده شده و سپس به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و سپس کشت شدند. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آمده است. همچنین مشخصات دما و بارندگی (منحنی آمبروترمیک) منطقه مورد آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از شخم و آماده سازی زمین، کرت‌هایی به طول ۲ و عرض ۲ متر ایجاد و عملیات تسطیح صورت گرفت. بین کرت‌ها، حدود ۰/۵ متر به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. کشت به صورت آبی بود و ۴ نوبت آبیاری در تاریخ‌های ۴ اردیبهشت، ۲۹ اردیبهشت، ۱۴ خرداد و ۲۴ خرداد ماه سال ۱۴۰۴ انجام گرفت. زمان برداشت تیمارهای تاریخ کاشت اول و دوم به ترتیب ۱۵ و ۲۵ تیرماه سال ۱۴۰۴ بود.

برای اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد دانه، از وسط هر کرت، ۱ مترمربع برداشت شد. نمونه‌برداری برگ برای اندازه‌گیری عناصر (برای تاریخ کاشت اول ده اردیبهشت و برای تاریخ کاشت دوم ۱۵ اردیبهشت) در مرحله ظهور سنبله (زادوکس ۵۵-۵۹) انجام شد. برای اندازه‌گیری عناصر برگ، مقدار یک گرم از برگ خشک شده در داخل بوتله چینی ریخته شده و در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت، تا به طور کامل خاکستر شود. سپس به نمونه خاکستر شده ۲۵ میلی لیتر محلول ۱:۱ اسید نیتریک افزوده شده و بعد از حرارت دادن تا دمای جوش نمونه صاف شده و بعد از حجم رسانی در بالن ۲۵ سی سی با آب مقطر جهت اندازه‌گیری استفاده شد. جهت اندازه‌گیری ابتدا دستگاه جذب اتمی (ANALYTIC GENNA مدل NOVA-400 ساخت کشور آلمان به همراه لامپ‌های مربوطه و مجهز به کپسول استیلن و کمپرسور هوا) را با محلول‌های استاندارد کالیبره کرده و با قرار دادن نمونه‌ها (محلول حاصل از خاکسترسازی) به‌طور مستقیم جذب نور حاصل از لامپ-

فیزیولوژیک مرتبط با تحمل به تنش و در نهایت عملکرد دانه گندم رقم سیمین است تا با شناسایی بهترین ترکیب مدیریتی، گامی در جهت کاهش خسارات ناشی از سرما و افزایش پایداری تولید این محصول راهبردی برداشته شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی ساعت‌لوی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۵۲ متر از سطح دریا واقع در ۲۵ کیلومتری ارومیه اجرا شد. منطقه از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود. با توجه به آمار هواشناسی بلند مدت در ارومیه، متوسط بارندگی سالیانه ۳۹۰ میلی‌متر، متوسط دما ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ۷۵٪ است. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل دو تاریخ کاشت (اول آبان ماه و اول دی ماه) و فاکتور دوم پیش‌تیمار بذر با (شاهد (بذر خشک)، سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار، جیبرلیک اسید ۱۵۰۰ میکرومولار، گابا ۱۰ میلی‌مولار، نیترات پتاسیم ۲۰۰ میلی-مولار، سولفات روی ۵۰ میلی‌مولار و ملاتونین ۱۰۰ میکرومولار) بود. کاشت به صورت خشکه کاری و روش درهم یا پخش انجام شد. رقم مورد استفاده سیمین (این رقم مناسب برای اقلیم سرد کشور بوده، دارای میانگین ارتفاع بوته ۹۳ سانتی‌متر، مقاوم به زنگ زرد و نیمه حساس به زنگ قهوه‌ای، مقاوم به خوابیدگی، میانگین عملکرد دانه ۹۵۰۰ کیلو گرم در هکتار، نیاز آبی یک نوبت موقع کاشت و سه نوبت در بهار، وزن هزار دانه ۴۲ گرم، رنگ دانه قرمز، کیفیت نانوایی خوب، میانگین درصد پروتئین ۱۲/۱ درصد و درصد گلوتن مرطوب ۳۰ درصد) بود تعداد بذر

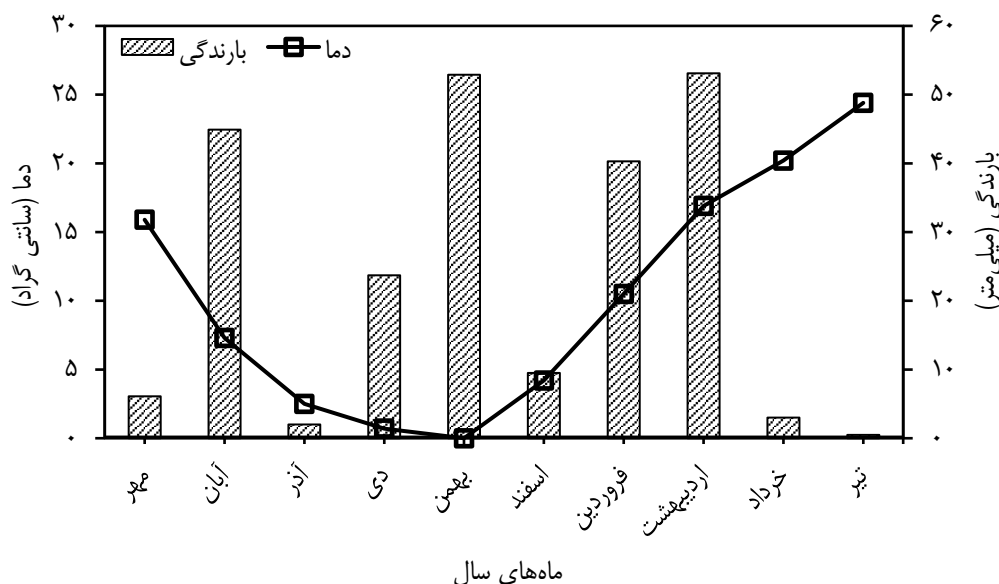
(Nielsen, 2024).

های کاتدی توخالی برای کلسیم، روی، آهن و منیزیم و
نشر اتمی حاصل برای سدیم و پتاسیم اندازه گیری شد

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی

Table 1- Some physical and chemical properties of the research farm soil

Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Saturation percentage (%)	Neutralization capacity (%)	CO (%)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	pH	EC (ds m ⁻¹)
Clay-Loam	15	55	30	45	14.3	0.83	0.09	3.14	610	8.22	1.25



شکل ۱- مشخصات دما و بارندگی (منحنی آمبروترمیک) منطقه مورد آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳

Figure 1. Temperature and rainfall characteristics (ambrothermic curve) of the tested area in the 2024-25 crop year

در این رابطه، NIC شاخص تغذیه‌ای کلسیم، Ca Sample
غلظت کلسیم تیمار و Ca Control غلظت کلسیم شاهد را
نشان می‌دهد.

کارایی استفاده از عناصر (Element Use Efficiency):
از طریق رابطه (۳) به دست آمده است (Santa-María et al., 2015).

$$EUE = \frac{[CEL]}{[SY]} \quad \text{رابطه ۳:}$$

در این رابطه، EUE کارایی مصرف عناصر، CEL غلظت
عناصر در برگ و SY عملکرد بذر است.

نرخ پر شدن دانه (Seed Filling Rate): نرخ پر شدن
دانه (SFR) از تقسیم مدت دوره پر شدن دانه بر وزن هزار دانه
محاسبه و سپس از رابطه (۴) اندازه‌گیری شد (Egli, 2004).

محاسبه شاخص‌های فیزیولوژیک و تغذیه‌ای

شاخص انتخاب‌گری جذب پتاسیم (Potassium

Absorption Selectivity Index): این شاخص از رابطه

(۱) محاسبه شد (Wang et al., 2009).

$$PASI = \frac{[K]}{[K] + [Na]} \quad \text{رابطه ۱:}$$

در این رابطه، PASI شاخص انتخاب‌گری جذب پتاسیم،
K پتاسیم و Na سدیم است.

شاخص تغذیه‌ای کلسیم (Nutritional Index of

Calcium): این شاخص از طریق رابطه (۲) محاسبه شد

(Loukou et al., 2018).

$$NIC = \frac{[Ca \text{ sample}]}{[Ca \text{ control}]} \times 100 \quad \text{رابطه ۲:}$$

رابطه ۴:

$$SFR = \frac{[DSFP]}{[W1000S]}$$

در این رابطه DSFP معرف مدت دوره پر شدن دانه و W1000S بیانگر وزن هزاردانه است.

$$SI = \frac{SY_1 \times SY_2}{(ASY_1)^2}$$

رابطه ۶:

در این رابطه، SI شاخص تنش، SY_1 عملکرد دانه در شرایط نرمال، SY_2 عملکرد دانه در شرایط تنش و ASY_1 میانگین عملکرد دانه در شرایط نرمال را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و MATATC انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون توکی در سطح پنج درصد انجام شد. همچنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثرات ساده تاریخ کاشت بر غلظت عناصر غذایی منیزیم، کلسیم، روی، آهن، پتاسیم در برگ، عملکرد دانه، شاخص پایداری غشاء، کارایی مصرف عناصر و نرخ پر شدن دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما بر نسبت کلسیم به منیزیم و شاخص تغذیه‌ای کلسیم تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین، اثرات ساده پیش‌تیمار بر کلیه صفات اندازه‌گیری‌شده به‌جز نسبت کلسیم به منیزیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل تاریخ کاشت × پیش‌تیمار نیز بر غلظت عناصر روی و پتاسیم در برگ، عملکرد دانه، غلظت کل عناصر برگ، کارایی مصرف عناصر و نرخ پر شدن دانه معنی‌دار بود، در حالی که بر صفات نسبت کلسیم به منیزیم، شاخص تغذیه‌ای کلسیم و شاخص پایداری غشاء معنی‌دار نبود.

شاخص پایداری غشاء (Stability Membrane Index): شاخص پایداری غشاء (SMI) توسط اندازه‌گیری هدایت الکتریکی مواد نشت کرده از نمونه‌های برگ (مرحله ظهور سنبله) به آب دوبار تقطیر، در دماهای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. ۰/۱ گرم نمونه برگی به صورت قطعاتی با اندازه‌های یکسان بریده شدند و در لوله‌های آزمایش محتوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر قرار داده شدند. تعدادی از نمونه‌ها در آب ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و تعدادی دیگر در آب ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری شدند و هدایت الکتریکی آنها (به ترتیب C_1 و C_2) با استفاده از EC متر مدل AZ86503، ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. این شاخص بر حسب درصد و برای ارزیابی سلامت غشاء از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Sairam & Srivastava, 2002).

رابطه ۵:

$$SMI = (1 - \frac{EC_1}{EC_2}) \times 100$$

در این رابطه، EC_1 هدایت الکتریکی اولیه و EC_2 هدایت الکتریکی ثانویه است.

شاخص تنش (Stress Index): شاخص تنش (SI) برای ارزیابی جامع تحمل به تنش تیمارها استفاده می‌شود و توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر پیش تیمارهای مختلف بذر بر صفات مختلف گندم تحت تاریخ‌های مختلف کاشت

Table 2- Analysis of variance (mean square) of the effect of different priming treatments on different wheat traits under different planting dates

S.O.V	df	Mg	Ca	Zn	Fe	K	Leaf Element Concentration
Block	2	55.017**	465.39**	0.00021 ^{ns}	0.014 ^{ns}	657.55**	1520.14**
Planting date(D)	1	242.16**	1413.69**	0.042**	0.74**	40064.33**	64713.04**
Pretreatment (P)	6	36.98**	415.05**	0.048**	0.13**	8626.59**	12717.44**
D×P	6	8.34 ^{ns}	8.87 ^{ns}	0.054**	0.018 ^{ns}	7025.04**	7074.60**

Error	26	3.87	31.78	0.00046	0.011	88.59	148.60
CV (%)	-	13.20	15.26	12.06	8.32	4.45	4.61

ns و **: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال خطای آماری یک درصد

ns and **: non-significant and significant at the level of one percent statistical probability, respectively

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر پیش تیمارهای مختلف بذر بر صفات مختلف گندم تحت تاریخ‌های مختلف کاشت

Table 2 continued- Analysis of variance (mean square) of the effect of different priming treatments on different wheat traits under different planting dates

S.O.V	df	Membrane Stability Index	Nutritional Index of Calcium	Element Use Efficiency	Seed Filling Rate	Seed Yield	Ca to Mg Ratio	Stress Index	
								df	MS
Block	2	48.11**	3191.66**	0.0015 ^{ns}	0.0076 ^{ns}	1924402.38**	0.86 ^{ns}	2	0.145 ^{ns}
Planting date(D)	1	285.11**	378.18 ^{ns}	0.40**	0.99**	28942515.66**	0.00053 ^{ns}	-	-
Pretreatment (P)	6	213.71**	4373.36**	0.39**	0.012**	4875196.21**	0.507 ^{ns}	6	0.337**
D×P	6	20.79 ^{ns}	93.51 ^{ns}	0.37**	0.015**	1168070.66*	0.319 ^{ns}	-	-
Error	26	9.20	220.11	0.00060	0.0034	395680.59	0.456	12	0.041
CV (%)	-	5.84	12.63	14.51	5.05	17.72	26.61	-	25.92

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال خطای آماری پنج و یک درصد

ns, * and **: non-significant and significant at the level of five and one percent statistical probability, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده تاریخ کاشت بر صفات مختلف گندم در مزرعه

Table 3- Mean comparison of the simple effects of planting date on different wheat traits in the field

Planting date	Mg (mg g ⁻¹ ash)	Ca (mg g ⁻¹ ash)	F (mg g ⁻¹ ash)	Membrane Stability Index (%)
First planting date (1 November)	17.31 a	42.74 a	1.44 a	54.54 a
Second planting date (1 December)	12.51 b	31.13 b	1.17 b	49.33 b

میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، فاقد اختلاف معنی دار بر اساس آزمون توکی در سطح ۵ درصد است.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات ساده پیش تیمارهای مختلف بذر بر صفات مختلف گندم در مزرعه

Table 4- Mean comparison of the simple effects of different pretreatments on different wheat traits in the field

Priming	Mg (mg g ⁻¹ ash)	Ca (mg g ⁻¹ ash)	F (mg g ⁻¹ ash)	Nutritional Index of Calcium (%)	Membrane Stability Index (%)	Stress Index
Control	11.93 c	31.62 bc	0.99 b	100.00 b	41.66 d	0.37 bc
Salicylic acid	15.74 ab	41.18 ab	1.40 a	132.11 a	46.84 cd	0.033 c
Gibberellic acid	13.14 bc	32.61 bc	1.34 a	103.09 b	54.36 ab	0.77 ab
GABA	17.64 a	41.36 ab	1.43 a	130.91 a	57.51 a	0.82 ab
Potassium nitrate	16.96 a	44.18 a	1.29 a	140.43 a	57.33 a	0.76 ab
Zinc sulfate	12.00 c	22.43 c	1.30 a	70.55 a	50.26 bc	0.84 ab
Melatonin	16.96 a	45.16 a	1.39 a	144.63 a	55.58 ab	1.006 a

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۰/۰۵ ندارند.

In each column, means with at least one common letter do not any statistical difference based on Tukey test at 0.05 probability level.

غلظت عناصر غذایی برگ

منیزیم: تاریخ کاشت دوم (اول دی) در مقایسه با تاریخ

کاشت اول (اول آبان) موجب کاهش ۲۸ درصدی غلظت

منیزیم برگ شد (جدول ۳).

در بین تیمارهای پیش تیمار، بیشترین غلظت منیزیم برگ

به ترتیب مربوط به تیمارهای گابا، ملاتونین و نترات پتاسیم

بود که نسبت به شاهد به طور میانگین حدود ۳۰ درصد

افزایش نشان دادند (جدول ۴).

غلظت کل عناصر برگ: میانگین غلظت کل عناصر اندازه گیری شده در برگ تحت تأثیر برهم کنش تاریخ کاشت و پیش تیمار قرار گرفت (جدول ۵). در تاریخ کاشت اول، نیترا ت پتاسیم با میانگین ۴۵۱/۸۷ (میلی گرم بر گرم خاکستر) و در تاریخ کاشت دوم، سالیسیلیک اسید با میانگین ۲۳۱/۵۹ (میلی گرم بر گرم خاکستر) بیشترین مقادیر را به خود اختصاص دادند.

شاخص های فیزیولوژیک و عملکردی

شاخص پایداری غشاء: تاریخ کاشت اول (۵۴/۵۴٪) به طور معنی داری شاخص پایداری غشاء را نسبت به تاریخ کاشت دوم (۴۹/۳۳٪) افزایش داد (جدول ۳). در بین تیمارهای پیش تیمار، گابا با میانگین ۵۷/۵۱٪ و سپس نیترا ت پتاسیم (۵۷/۳۳٪) و ملاتونین (۵۵/۵۸٪) بالاترین مقادیر این شاخص را داشتند (جدول ۴).

شاخص تغذیه ای کلسیم: این شاخص تنها تحت تأثیر پیش تیمار قرار گرفت (جدول ۲). ملاتونین با ۱۴۴/۶۳٪ بیشترین و سولفات روی با ۷۰/۵۵٪ کمترین مقدار شاخص تغذیه ای کلسیم را ایجاد کردند (جدول ۴).

شاخص تنش: سالیسیلیک اسید با کمترین مقدار شاخص تنش (۰/۰۳۳) و ملاتونین با بیشترین مقدار (۱/۰۰۶) از سایر تیمارها متمایز شدند (جدول ۴).

کلسیم: تاریخ کاشت دوم سبب کاهش ۲۷ درصدی غلظت کلسیم برگ نسبت به تاریخ کاشت اول شد (جدول ۳). تیمارهای ملاتونین و نیترا ت پتاسیم به ترتیب با افزایش ۳۰ و ۲۹ درصدی، بیشترین تأثیر را بر افزایش غلظت کلسیم برگ نسبت به شاهد داشتند (جدول ۴). در مقابل، تیمار سولفات روی کمترین غلظت کلسیم را ایجاد نمود.

آهن: غلظت آهن برگ در تاریخ کاشت دوم ۱۹ درصد کمتر از تاریخ کاشت اول بود (جدول ۳). کلیه تیمارهای پیش تیمار موجب افزایش معنی دار غلظت آهن برگ شدند، به طوری که بیشترین افزایش مربوط به تیمارهای گابا (۳۱٪)، سالیسیلیک اسید و ملاتونین (هر کدام ۲۹٪) بود (جدول ۴).

روی و پتاسیم: برهم کنش تاریخ کاشت و پیش تیمار بذر بر غلظت این دو عنصر معنی دار بود (جدول ۵). در تاریخ کاشت اول، نیترا ت پتاسیم با ۸۱ درصد افزایش، بیشترین تأثیر را بر غلظت روی در برگ داشت. در تاریخ کاشت دوم، گابا با ۶۰ درصد افزایش، مؤثرترین تیمار بود. به طور کلی، تاریخ کاشت دوم میانگین غلظت روی در برگ را ۳۰ درصد کاهش داد. در رابطه با پتاسیم، در تاریخ کاشت اول، تیمار نیترا ت پتاسیم (۵۳٪ افزایش)، ملاتونین (۲۶٪) و سولفات روی (۲۵٪) و در تاریخ کاشت دوم، تیمارهای گابا (۴۲٪) و ملاتونین (۳۳٪) بیشترین افزایش غلظت پتاسیم برگ نسبت به شاهد را سبب شدند.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تاریخ های مختلف کاشت و پیش تیمارهای مختلف بذر بر صفات مختلف گندم در مزرعه

Table 5- Mean comparison of the interaction effects of different planting dates and different priming treatments on different wheat traits in the field

Planting date × Pretreatment		Zn (mg g ⁻¹ ash)	K (mg g ⁻¹ ash)	Seed Yield (kg ha ⁻¹)
First planting date (1 November)	Control	0.118 de	177.80 de	3248.33 cde
	Salicylic acid	0.144 cde	223.10 bc	3638.33 bcd
	Gibberellic acid	0.186 c	213.20 bc	4908.33 a
	GABA	0.173 cd	222.56 bc	4935.00 a
	Potassium nitrate	0.607 a	379.96 a	4256.66 abc
	Zinc sulfate	0.116 de	235.63 b	4550.00 ab
	Melatonin	0.129 cde	241.46 b	5111.66 a
Second planting date	Control	0.104 e	138.32 f	2168.33 e
	Salicylic acid	0.134 cde	182.31 de	163.25 f

(1 December)	Gibberellic acid	0.173 cd	162.30 ef	2986.66 de
	GABA	0.263 b	238.46 b	3176.66 cde
	Potassium nitrate	0.120 de	176.19 de	3385.00 cde
	Zinc sulfate	0.115 de	158.99 ef	3386.66 bcd
	Melatonin	0.117 de	204.74 cd	3760.00 bcd

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۰/۰۵ ندارند.

In each column, means with at least one common letter do not any statistical difference based on Tukey test at 0.05 probability level.

ادامه جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تاریخ‌های مختلف کاشت و پیش تیمارهای مختلف بذر بر صفات مختلف گندم در مزرعه

Table 5 continued- Mean comparison of the interaction effects of different planting dates and different pretreatments on different wheat traits in the field

Planting date × Priming		Leaf Element Concentration (mg g ⁻¹ ash)	Element Use Efficiency (g of seed per mg of element)	Seed Filling Rate (mg per seed per day)
First planting date	Control	227.52 de	0.073 b	1.403 a
	Salicylic acid	290.76 bc	0.086 b	1.316 ab
	Gibberellic acid	269.75 c	0.056 b	1.326 ab
	GABA	293.13 bc	0.056 b	1.316 ab
	Potassium nitrate	451.87 a	0.110 b	1.310 ab
	Zinc sulfate	279.48 bc	0.060 b	1.253 ab
	Melatonin	313.16 b	0.060 b	1.306 ab
Second planting date	Control	177.92 f	0.083 b	0.973 c
	Salicylic acid	231.59 de	1.41 a	1.200 b
	Gibberellic acid	200.33 ef	0.070 b	0.953 c
	GABA	289.21 bc	0.093 b	0.980 c
	Potassium nitrate	229.89 de	0.070 b	0.963 c
	Zinc sulfate	186.87 f	0.063 b	1.013 c
	Melatonin	260.33 cd	0.073 b	0.993 c

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۰/۰۵ ندارند.

In each column, means with at least one common letter do not any statistical difference based on Tukey test at 0.05 probability level.

دوم، ملاتونین (۴۲٪ افزایش) و نیترات پتاسیم و سولفات روی (هر کدام ۳۶٪ افزایش) مؤثرترین تیمارها بودند. به‌طور کلی، تاریخ کاشت دوم موجب کاهش ۳۸ درصدی عملکرد دانه نسبت به تاریخ کاشت اول شد.

بحث

یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تاریخ کاشت دیرتر (اول دی) به‌عنوان القاکننده شرایط تنش سرما، اثرات بازدارنده قابل‌توجهی بر جذب و انباشت عناصر غذایی کلیدی در برگ گندم رقم سیمین دارد. نمودار دمای ماهانه نشان داد که گیاهان تاریخ کاشت دوم، میانگین دمای ۰/۶- درجه در بهمن و ۰/۷ درجه در دی را تجربه کرده‌اند که قطعاً در محدوده تنش سرما (زیر ۵ درجه) است. اگرچه تأخیر در کاشت به خودی خود می‌تواند سبب کاهش عملکرد شود، اما در این پژوهش با استناد به داده‌های هواشناسی، بخش عمده‌ای از کاهش

کارایی استفاده از عناصر: این صفت تحت تأثیر بر همکنش تاریخ کاشت و پیش تیمار قرار گرفت (جدول ۵). در تاریخ کاشت دوم، تیمار سالیسیلیک اسید با میانگین ۱/۴۱ (گرم دانه بر میلی گرم عنصر) بیشترین کارایی مصرف عناصر را نشان داد.

نرخ پر شدن دانه: در تاریخ کاشت اول، ملاتونین (۳۹٪ افزایش) و در تاریخ کاشت دوم، ملاتونین (۴۱٪ افزایش) و نیترات پتاسیم (۳۸٪ افزایش) بیشترین تأثیر را بر افزایش نرخ پر شدن دانه نسبت به شاهد داشتند (جدول ۵).

عملکرد دانه: همه تیمارهای پیش تیمار بذر در هر دو تاریخ کاشت (به‌جز سالیسیلیک اسید در تاریخ کاشت دوم) موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد (بدون پیش تیمار) شدند (جدول ۵). در تاریخ کاشت اول، ملاتونین (۳۷٪ افزایش) و گابا (۳۵٪ افزایش) و در تاریخ کاشت

جذب عناصر و عملکرد به تنش سرمای تجربه شده در مراحل اولیه رشد نسبت داده می شود. به عبارت دیگر، گیاهان در مراحل رشد متفاوت در هر دو تاریخ کاشت این سرما را تجربه کرده اند. در تاریخ کاشت دوم گیاهان کوچکتر بدون آمادگی با سرمای شدید مواجه شده اند. کاهش معنی دار غلظت منیزیم (۲۸٪)، کلسیم (۲۷٪)، آهن (۱۹٪) و روی (۳۰٪) در برگ تحت تاریخ کاشت دوم را می توان عمدتاً ناشی از محدودیت در فعالیت ریشه و کارایی جذب در خاک سرد، کاهش سرعت تعرق و انتقال آوندی و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با تقاضا و مصرف این عناصر دانست (Alam et al., 2022). این افت تغذیه ای به نوبه خود، با تأثیر منفی بر ساختار کلروفیل (منیزیم)، استحکام دیواره سلولی (کلسیم) و زنجیره انتقال الکترون (آهن)، کارایی فتوسنتز و در نهایت تولید ماده خشک را محدود کرده و به کاهش ۳۸ درصدی عملکرد دانه منجر شده است.

در مقابل، کاربرد روش پیش تیمار بذر، راهکاری مؤثر برای تعدیل این اثرات منفی تنش سرما شناسایی شد. بهبود غلظت تمامی عناصر غذایی اندازه گیری شده در برگ تحت تأثیر تیمارهای پیش تیمار (به ویژه گابا، ملاتونین و نیتрат پتاسیم) نشان دهنده نقش این ترکیبات در بهبود توسعه سامانه ریشه ای، تنظیم تعادل اسمزی و یونی و افزایش راندمان جذب در شرایط نامساعد است. به طور خاص، افزایش چشمگیر شاخص پایداری غشاء تحت تیمار گابا (۳۸٪ نسبت به شاهد) با گزارش های مربوط به نقش این ترکیب در کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفظ یکپارچگی غشای سلولی تحت تنش های محیطی همخوانی دارد (Malekzadeh et al., 2012; Farooq et al., 2017). این امر می تواند زمینه ساز بهبود جذب و انتقال یونها باشد.

تخریب غشای سلولی می تواند به عنوان یک معیار مناسب جهت بررسی واکنش گیاهان به تنش های محیطی مورد بررسی قرار گیرد؛ زیرا افزایش نشت پذیری غشاء سلولی

تحت تأثیر تنش های محیطی، منجر به کاهش تورژسانس سلول ها و اختلال در فرآیندهای آنزیمی دخیل در رشد گیاهچه شده که در نهایت منجر به کاهش رشد گیاهچه ها می شود (Gholinezhad et al., 2020). نتایج پژوهش Mansouri & Omid (2022) نشان داد که استفاده از نیترات پتاسیم در پیش تیمار بذور کینوا موجب بهبود پایداری غشاء و کاهش میزان نشت الکترولیت ها از غشاء سلولی شد. پتاسیم موجود در نیترات پتاسیم موجب تحریک سنتز فنل ها و به دنبال آن افزایش فعالیت آنتی اکسیدان ها می شود. اثرات مثبت نیترات پتاسیم در کاهش نشت الکترولیت ها می تواند به علت وجود همین خاصیت باشد، که مؤید نتایج حاصل در این پژوهش است. برهمکنش معنی دار تاریخ کاشت و پیش تیمار بر بسیاری از صفات، نشان دهنده وابستگی پاسخ گیاه به نوع محرک پیش تیمار به شرایط محیطی است. برای مثال، برتری نیترات پتاسیم در افزایش غلظت روی و پتاسیم برگ در تاریخ کاشت اول (شرایط مطلوب تر) می تواند ناشی از اثر تغذیه ای مستقیم و نقش هم افزایی پتاسیم در فعال سازی آنزیم ها و جذب سایر عناصر باشد (Hassan Ashraa & Kalee & Ali, 2024). از سوی دیگر، عملکرد مطلوب گابا در تاریخ کاشت دوم (شرایط تنش) احتمالاً مرتبط با فعالیت آنتی اکسیدانی و نقش آن در پیام رسانی مقاومت به تنش است (Shelp et al., 2012; Li et al., 2016). از سوی دیگر، پاسخ متفاوت سالیسیلیک اسید (کاهش عملکرد علیرغم افزایش کارایی مصرف عناصر در تاریخ دوم) نیاز به بررسی های بیشتر در مورد تعادل بین تخصیص منابع به دفاع در برابر تنش و تولید ماده خشک تحت کاربرد این هورمون دارد. سالیسیلیک اسید سبب تشدید نیترات ردوکتاز سلول ها می شود به دنبال آن جذب نیتروژن و میزان نیتروژن گیاه نیز افزایش یافته است. در نتیجه،

است که ملاتونین به علت اثرات شبه اکسینی خود، ایفاگر عملکردهای ضروری در تنظیم رشد و نمو گیاه شامل فرآیندهای تحریک رشد رویشی، جوانه زنی، ریشه دهی و بهبود عملکرد است (Oloumi & Ahmadi Mousavi, 2022).

تنش توسط بسته شدن روزنه ی برگ و به دنبال آن کاهش فتوسنتز و تحت تأثیر قرار دادن فعالیت های آنزیمی و فرایندهای متابولیسمی مربوط، موجب کاهش عملکرد دانه می شود (Haddad et al., 2022). استفاده از ملاتونین به عنوان تنظیم کننده رشد گیاهی می تواند از جمله راهکارهای عملی و مقرون به صرفه برای کاهش خسارت های ناشی از تنش های محیطی از جمله سرما باشد. این هورمون اثرهای زیستی به سزایی روی رشد و نمو گیاه و کنترل و بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی آن دارد و در نهایت سبب افزایش مقاومت گیاه به تنش می شود (Kaya et al., 2020; Barand et al., 2020).

همچنین براساس نتایج حاصل از پژوهش Shojaei Baghini & Naghizadeh (2024)، مشخص شد کاربرد ملاتونین، مقاومت گیاه زیره سبز را در برابر تنش توسط افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، افزایش تجمع اسمولیت های سازگار پرولین و کربوهیدرات ها و نیز حفظ پایداری غشاء افزایش داد و در نهایت افزایش عملکرد دانه زیره سبز را به همراه داشت که با نتایج به دست آمده از پژوهش ما مطابقت داشت.

در مجموع، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که انتخاب تاریخ کاشت بهینه (اول آبان) به عنوان یک راهکار ساده زراعی، پایه ای اساسی برای دستیابی به پتانسیل عملکرد گندم فراهم می کند. بر این اساس، ملاتونین به عنوان یک تیمار پیش تیمار جامع نگر برای بهبود همزمان صفات تغذیه ای، فیزیولوژیک و عملکردی و گابا به عنوان گزینه ای ویژه برای افزایش مقاومت غشاء و تحمل به تنش در شرایط نامساعد، قابل توصیه هستند. برای تدوین توصیه های نهایی،

شرایط رشدی و تغذیه ای گیاه همچون جذب پتاسیم در گیاه بهبود می یابد. سالیسیلیک اسید، جذب عناصر سدیم را کاهش و پتاسیم را افزایش می دهد که بیانگر نقش آن در حفظ و ثبات هم ایستایی یونی گیاه است (Hasanvand et al., 2020). در پژوهش دیگری نیز گزارش شده است که اثر بهبودی سالیسیلیک اسید بر رشد گیاه تحت تنش می تواند به نقش آن در جذب مواد غذایی، ارتباط آبی، تنظیم روزنه ای و مقدار کلروفیل مربوط باشد (Song et al., 2023).

عملکرد برتر ملاتونین در افزایش شاخص تغذیه ای کلسیم، نرخ پر شدن دانه و عملکرد نهایی در هر دو تاریخ کاشت، این ترکیب را به عنوان یک تنظیم کننده رشد چندکاره و مؤثر متمایز می سازد. این نتایج با پژوهش هایی که نقش ملاتونین را در تنظیم باز شدن روزنه ها، بهبود نقل و انتقال کلسیم (Kolupaev et al., 2024) و توزیع مجدد مواد فتوسنتزی به سمت دانه گزارش کرده اند، مطابقت دارد (Chattha et al., 2024). بر اساس نتایج حاصل از آزمایش های مزرعه ای، اگرچه تنش به ویژه تنش شدید سبب کاهش دوره رشد گیاه، کاهش نرخ پر شدن دانه و همچنین کاهش عملکرد گیاه می شود، اما تیمار ملاتونین تأثیر معنی دار و مثبتی بر تیمارهای آزمایشی شامل دوره رشد گیاه، نرخ پر شدن دانه و اجزای عملکرد دارد (Almasi & Karamian, 2025).

پتانسیل پیش تیمار بذر توسط ملاتونین به عنوان عامل استعمال خارجی، نتیجه نقش دوگانه آن به عنوان هم مولکول آنتی اکسیدانت مستقیم و همچنین به عنوان تحریک کننده پاسخ های آنتی اکسیدانتی در گیاهان است. بنابراین به نظر می رسد پرایمینگ بذور با ملاتونین به علت کاهش آسیب ناشی از تنش ها بر روی رشد گیاهچه، شرایط کلی گیاهچه را بهبود داده و موجب شده گیاهچه تحت شرایط تنش ها، رشد و عملکرد قابل قبولی را داشته باشد (Heshmati et al., 2019). همچنین گزارش شده

بررسی‌های اقتصادی و نیز بررسی سازوکارهای مولکولی پشت این بهبودها پیشنهاد می‌شود.

جمع‌بندی

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تاریخ کاشت به‌عنوان یک عامل مدیریتی کلیدی، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر مواجهه گیاه گندم با تنش سرما و در نتیجه وضعیت تغذیه‌ای، فیزیولوژیک و عملکرد نهایی آن دارد. کشت زود هنگام (اول آبان) در مقایسه با کشت دیر هنگام (اول دی)، با اجتناب نسبی از شرایط تنش زای سرما، منجر به بهبود معنی‌دار در جذب و انباشت عناصر غذایی حیاتی (به‌ویژه منیزیم، کلسیم و آهن)، افزایش پایداری غشای سلولی و در نهایت افزایش ۳۸ درصدی عملکرد دانه شد. بنابراین، رعایت تاریخ کاشت بهینه، نخستین و اساسی‌ترین راهکار برای کاهش خسارت ناشی از سرمای پاییزه در مناطق مشابه به‌شمار می‌آید.

در شرایطی که کشت دیر هنگام اجتناب‌ناپذیر است یا احتمال مواجهه با تنش سرما وجود دارد، پیش‌تیمار بذریه با ترکیبات محرک مقاومت راهکاری عملی و مؤثر برای تعدیل اثرات منفی تنش است. در بین تیمارهای مورد بررسی، ملاتونین به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد قوی، با برتری چشمگیر در بهبود شاخص تغذیه‌ای کلسیم، تسریع پر شدن دانه و افزایش نهایی عملکرد در هر دو تاریخ

Journal, 11(2), 533-538.

<https://B2n.ir/bu2721>

Almasi, N., & Karamian, R. (2025). The effect of melatonin and copper oxide nanoparticles on drought tolerance in selected wheat cultivars. *Journal of Plant Biological Sciences*, 17(3), 25-46. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2025.147187.1425> [In Persian]

Barand, A., Nasibi, F., Manouchehri Kalantari, K. H., & Moradi, M. (2020). The effects of foliar application of melatonin on some physiological and biochemical characteristics and expression of fatty acid desaturase gene in pistachio seedlings (*Pistacia vera* L.) under freezing stress.

کاشت، جامع‌ترین اثر بخشی را نشان داد. گابا (گاما آمینوبوتیریک اسید) نیز به‌ویژه در افزایش مقاومت غشای سلولی و تحمل گیاه در شرایط تنش زای تاریخ کاشت دوم مؤثر بود. نیترات پتاسیم بیشترین تأثیر را بر غلظت کل عناصر برگ در شرایط مطلوب (تاریخ کشت اول) داشت.

بر اساس یافته‌های حاصل از این پژوهش یک‌ساله، الگوی مدیریتی ترکیبی "کشت زود هنگام + پیش‌تیمار بذریه با ملاتونین" به‌عنوان راهبرد امیدبخش برای دستیابی به عملکرد و پایداری تولید گندم رقم سیمین در مناطق با خطر تنش سرمای پاییزه مطرح می‌شود. با این وجود، به‌علت ماهیت نوسان‌پذیر تنش سرمایی در سال‌های مختلف، توصیه این الگو به‌صورت قطعی نیازمند اعتبارسنجی در یک دوره حداقل دو تا سه ساله در مکان‌ها یا سال‌های متفاوت است. در شرایطی که کشت دیر هنگام اجتناب‌ناپذیر باشد، پیش‌تیمار بذریه با ملاتونین یا گابا توانست در این پژوهش افت عملکرد را به‌طور معنی‌دار، اما وابسته به سال کاهش دهد. برای تعمیم این نتایج، انجام پژوهش‌های چندساله و چندمکانه روی ارقام مختلف گندم ضروری است. همچنین پژوهش‌های ژنتیکی-مولکولی برای درک دقیق‌تر سازوکارهای عمل این محرک‌ها به‌طور جدی پیشنهاد می‌شود.

References

- Ahmed, R., Mu, J., Xing, J., Nisa, M. U., Zhang, Y., Ding, P., ... & Sun, M. (2025). Impact of foliar application of zinc sulphate with nitrogen fertilizer on morphological responses and yield improvement of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Plant Production*, 19(4), 709-720. <https://doi.org/10.1007/s42106-025-00360-4>
- Alam, M. S., Kumar, R., & Patel, J. N. (2022). Effect of sowing dates and varieties on the nutrient uptake and economics of wheat crop (*Triticum aestivum* L.) under changing climate. *The Pharma Innovation*

- Journal of Plant Interaction*, 15(1), 257-265.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2020.1781271>
- Chattha, M. U., Iqbal, L., Khan, I., Wang, L. H., Nawaz, M., Ali, B., & Abd Allah, E. F. (2024). Regulating effects of exogenous salicylic acid application on wheat growth under saline and heat stress conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 22(2), 1315-1337.
http://doi.org/10.15666/aecer/2202_13151337
- Egli, D. B. (2004). Seed-fill duration and yield of grain crops. *Advances in Agronomy*, 83(243), 83005.
[http://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)83005-0](http://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)83005-0)
- FAO (2023). *Food and agriculture organization of the United Nations (FAOSTAT)*. Data of crop production. Available online: <https://www.statista.com/statistics>.
- Farooq, M., Hussain, M., Nawaz, A., Lee, D. J., Alghamdi, S. S., & Siddique, K. H. M. (2017). Seed priming improves chilling tolerance in chickpea by modulating germination metabolism, trehalose accumulation and carbon assimilation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 274-283.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.012>
- Gholinezhad, E., Samsami, N., & Abhari, A. (2020). Effect of drought stress, mycorrhiza and bacteria on mother plant on produced seed vigor and its related traits in soybean (*Glycine max* cv. Kosar). *Iranian Journal of Seed Research*, 7(1), 99-119.
<http://doi.org/10.29252/yujs.7.1.99> [In Persian]
- Haddad, N., Choukri, H., Ghanem, M. E., Smouni, A., Mentag, R., Rajendran, K., Hejjaoui, K., Maalouf, F., & Kumar, S. (2022). High temperature and drought stress effects on growth, yield and nutritional quality with transpiration response to vapor pressure deficit in lentil. *Plants*, 11(1), 95-112.
<https://doi.org/10.3390/plants11010095>
- Hasanvand, H., Siadat, S., Bakhshandeh, A., Moradi Telavat, M. R., & Poshtdar, A. (2020). Effects of salicylic acid on yield and nutrient uptake of borage (*Borago officinalis* L.) under interrupting irrigation conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(2), 519-531.
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.2035.1504> [In Persian]
- Hassan Ashraa Kalee, H. H., & Ali, A. H. (2024). Effect of potassium nitrate on seed priming for wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Kirkuk University for Agricultural Sciences*, 15(2), 73-80.
<https://doi.org/10.58928/KU24.15208>
- Heshmati, S., Akbari, G. A., Soltani, E., & Amini Dehaghi, M. (2019). The effect of seed priming at different seed quality by melatonin on seedling emergence and growth characteristic of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under stress combination of salinity and drought. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(4), 1275-1289.
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.1703.1384> [In Persian]
- Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). The role of nitrate reductase in brassinosteroid-induced endogenous nitric oxide generation to improve cadmium stress tolerance of pepper plants by upregulating the ascorbate-glutathione cycle. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, 110-122.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110483>
- Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2020). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>
- Kolupaev, Y. E., Taraban, D. A., Karpets, Y. V., Kokorev, A. I., Yastreb, T. O., Blume, Y. B., & Yemets, A. I. (2024). Involvement of ROS and calcium ions in developing heat resistance and inducing antioxidant system of wheat seedlings under melatonin's effects. *Protoplasma*, 261(5), 975-989.
<https://doi.org/10.1007/s00709-024-01952-z>
- Krishnan, S., Laskowski, K., Shukla, V., & Merewitz, E. B. (2013). Mitigation of drought stress damage by exogenous application of a non-protein amino acid γ -aminobutyric acid on perennial ryegrass.

- Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(5), 358-366.
<https://doi.org/10.21273/JASHS.138.5.358>
- Li, W., Liu, J., Ashraf, U., Li, G., Li, Y., Lu, W., Gao, L., Han, F., & Hu, J. (2016). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) application improved early growth, net photosynthesis, and associated physio-biochemical events in maize. *Section Plant Physiology and Metabolism*, 7, 919.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00919>
- Loukou, A. L., Anvoh, K. Y. B., Kouakou, K. H., & Brou, K. (2018). Nutritional composition and bioavailability prediction calcium, iron, zinc and magnesium in *Justicia galeopsis* leaves in Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(6), 2615-2625.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i6.12>
- Ma, Q., Bell, R., & Biddulph, B. (2019). Potassium application alleviates grain sterility and increases yield of wheat (*Triticum aestivum*) in frost-prone Mediterranean-type climate. *Plant and Soil*, 434(1), 203-216.
<https://doi.org/10.1007/s11104-018-3620-y>
- Malekzadeh, P., Khara J., & Heidari, R. (2012). Effect of exogenous Gama-aminobutyric acid on physiological tolerance of wheat seedlings exposed to chilling stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 3(1), 611-617.
<https://doi.org/10.30495/ijpp.2012.540670>
- Martínez-Moreno, F., Solís, I., Noguero, D., Blanco, A., Özberk, İ., Nsarellah, N., Elias, E., Mylonas, I., Soriano, J. M. (2020). Durum wheat in the Mediterranean Rim: Historical evolution and genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67(6), 1415-1436.
<https://doi.org/10.1007/s10722-020-00913-8>
- Mansouri, A., & Omid, H. (2022). Effect of priming and seed age on germination, photosynthetic pigments, and biochemical content of Quinoa seedling. *Plant Process and Function*, 11(50), 243-260.
<https://jispp.iut.ac.ir/article-1-1813-en.pdf> [In Persian]
- Muhammad, I., Ahmad, S., & Shen, W. (2024). Melatonin-mediated molecular responses in plants: Enhancing stress tolerance and mitigating environmental challenges in cereal crop production. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(8), 4551.
<https://doi.org/10.3390/ijms25084551>
- Nielsen, S. S. (2024). *Nielsen's Food Analysis*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-50643-7>
- Oloumi, H., & Ahmadi Mousavi, E. S. (2022). Melatonin; growth regulator and strong antioxidant in plants. *Plant Process and Function*, 1, 37-54.
<https://jispp.iut.ac.ir/article-1-1621-fa.html> [In Persian]
- Omid, Z., Saidi, M., & Mohammadi, M. (2024). The effect of GABA on some morpho-physiological parameters of watermelon seedlings under cold stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 8(1), 1-18.
<https://doi.org/10.22034/iuvs.2024.2028761.1364>
- Pramanik, S. K. (2022). Foliar application of potassium and gibberellic acid (GA3) to alleviate drought stress in wheat. *Journal of Science and Technology*, 1-10.
<https://www.doi.org/10.59125/JST.20201>
- Rasheed, A., Feng, Q., Adil, M. F., Ahsan, M., Han, Z., Zeng, F., & Shamsi, I. H. (2022). Comparative study on the physio-biochemical responses of spring and winter barley genotypes under vernalized and greenhouse conditions. *Agronomy*, 12(2), 339.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12020339>
- Rathore, M., Pravalika, Y., Kumar, Y., Tutlani, A., & Aggarwal, N. (2024). Enhancing seed quality and insect management in wheat (*Triticum aestivum* L.) through optimization of storage treatments with natural and chemical compounds. *Plant Archives*, 24(1), 26-36.
<https://doi.org/10.51470/plantarchives.2024.v24.no.1.004>
- Rehman, A., Farooq, M., Ullah, A., Nawaz, A., ud Din, M. M., & Shahzad, B. (2022). Seed priming with zinc sulfate and zinc chloride affects physio-biochemical traits, grain yield and biofortification of bread wheat (*Triticum aestivum*). *Crop and Pasture Science*, 73(5), 449-460.
<https://doi.org/10.1071/CP21194>

- Roustaii, M. (2009). Study of cold tolerance and some agronomic traits of bread and durum wheat genotypes in dryland areas. *Seed and Plant Improvement Journal* 25(1), 275-295. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113394603> [In Persian]
- Saeed, S., Ullah, S., Amin, F., Al-Hawadi, J. S., Okla, M. K., Alaraidh, I. A., ... & Fahad, S. (2024). Salicylic acid and Tocopherol improve wheat (*Triticum aestivum* L.) Physio-biochemical and agronomic features grown in deep sowing stress: a way forward towards sustainable production. *BMC Plant Biology*, 24(1), 477. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05180-8>
- Saidi, M., Aliakbary, K., Hasanbeigi, H., & Mohammadi, M. (2020). The effect of GABA in induction of chilling resistance in Cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings. *Journal of Vegetables Sciences*, 3(6), 1-14. <https://doi.org/10.22034/iuvs.2020.115370.1072>
- Sairam, R. K., & Srivastava, G. C. (2002). Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science*, 162(6), 897-904. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00037-7)
- Sanghera, G. S., Wani, S. H., Hussain, W., & Singh, N. B. (2011). Engineering cold stress tolerance in crop plants. *Current Genomics*, 12(1), 30-43. <https://doi.org/10.2174/138920211794520178>
- Santa-María, G.E., Moriconi, J.I., & Oliferuk, S. (2015). Internal efficiency of nutrient utilization: what is it and how to measure it during vegetative plant growth? *Journal of Experimental Botany*, 66(11), 3011-3018. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv162>
- Shelp, B. J., Bozzo, G. G., Trobacher, C. P., Zarei, A., Deyman, K. L., & Brikis, C. J. (2012). Contribution of putrescine to 4-aminobutyrate (GABA) production in response to abiotic stress. *Plant Science*, 193, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.06.001>
- Shojaei Baghini, M. H., & Naghizadeh, M. (2024). Evaluation of the effect of foliar application of brassinosteroid and melatonin on some physiological, grain yield and cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(1), 155-173. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.362048.3310> [In Persian]
- Song, W., Shao, H., Zheng, A., Zhao, L., & Xu, Y. (2023). Advances in roles of salicylic acid in plant tolerance responses to biotic and abiotic stresses. *Plants*, 12(19), 3475. <https://doi.org/10.3390/plants12193475>
- Tanin, M. J., Sharma, A., Ram, H., Singh, S., Srivastava, P., Mavi, G. S., ... & Sohu, V. S. (2023). Application of potassium nitrate and salicylic acid improves grain yield and related traits by delaying leaf senescence in Gpc-B1 carrying advanced wheat genotypes. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1107705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1107705>
- Vijayakumar, S., Kumar, D., Shivay, Y. S., Anand, A., Saravanane, P., & Singh, N. (2019). Potassium fertilization for enhancing yield attributes, yield and economics of wheat (*Triticum aestivum*). *Indian Journal of Agronomy*, 64(2), 226-231. <https://doi.org/10.59797/ija.v64i2.5258>
- Wang, C. M., Zhang, J. L., Liu, X. S., Li, Z., Wu, G. Q., Cai, J. Y., Flowers, T. J., & Wang, S. M. (2009). Puccinellia tenuiflora maintains a low Na⁺ level under salinity by limiting unidirectional Na⁺ influx resulting in a high selectivity for K⁺ over Na⁺. *Plant, Cell and Environment*, 32, 486-496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01942.x>
- Wang, Y., Luo, Z., Huang, X., Yang, K., Gao, S., & Du, R. (2014). Effect of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel. *Scientia Horticulturae*, 168, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.022>