Research Article

Agricultural Engineering., 49(2) (2026) 261- 277

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/AGEN.2026.52569.1819

ISSN (E): 2588-5944

Comparison of Potassium Sulfate and Potassium Chloride Efficiency in Improving Nutrition and Yield Productivity of Irrigated Wheat with Emphasis on Split Application

N, Moradi[1]*, M. Pasandideh[2] and M. Moghbeli[3]

1. Associate professor, Soil and Water Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran. (Email: n_moradi18@yahoo.com)
2. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
3. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Received: 11 July 2026 Accepted: 08 September 2026 *Corresponding Author: n_moradi18@yahoo.com

Abstract

Introduction: Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the world's most important cereal crops and plays a vital role in global food security. Efficient potassium management is essential for sustaining wheat productivity and improving potassium use efficiency, particularly in calcareous soils where potassium availability is often restricted despite adequate total soil K reserves. Potassium sulfate (SOP) and potassium chloride (MOP) are the two most commonly used potassium fertilizers; however, comparative information on their agronomic performance under irrigated calcareous soil conditions remains limited. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of these two potassium sources on wheat productivity, nutrient uptake, potassium use efficiency, and economic profitability.

Materials and Methods: A field experiment was conducted during the 2023–2024 growing season at the Aibolu experimental farm (Urmia) using a randomized complete block design with three treatments (NP control, SOP at 100 kg ha^{-1}, and MOP at 80 kg ha^{-1}) and five replications. Application rates were adjusted to provide equivalent amounts of K_2O, and potassium was applied in split applications at tillering and stem elongation. At physiological maturity, grain yield, yield components, and leaf nutrient concentrations were determined. Agronomic efficiency of potassium (AEK), partial factor productivity of potassium (PFP_K), and partial budget analysis were calculated. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were separated using the LSD test at $P \leq 0.05$.

Results and Discussion: Potassium fertilization significantly increased grain yield and improved all measured agronomic traits compared with control. Grain yield increased from 5620 kg ha^{-1} in the control treatment to 6500 kg ha^{-1} with potassium sulfate (SOP) and 6230 kg ha^{-1} with potassium chloride (MOP). Straw yield, biological yield, thousand-kernel weight, spike density, and grains per spike also increased significantly following potassium application. Among the two potassium sources, SOP consistently produced superior agronomic performance, suggesting that the additional sulfur supplied by SOP contributed to improved crop performance. Leaf nutrient analysis demonstrated that potassium fertilization significantly improved leaf potassium concentration and enhanced the accumulation of iron and manganese. The greater micronutrient concentrations recorded in the SOP treatment were likely associated with the additional sulfur supplied by

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

potassium sulfate, which improved nutrient availability and uptake under alkaline calcareous soil conditions. This improved nutritional balance likely contributed to enhanced physiological activity and, consequently, greater grain production.
Potassium use efficiency indices also favored the SOP treatment. Agronomic efficiency of potassium (AEK) reached 17.6 kg grain kg^{-1} K_2O for SOP, compared with 12.71 kg grain kg^{-1} K_2O for MOP, indicating a substantially greater yield response per unit of applied potassium. In contrast, partial factor productivity of potassium (PFP_K) was nearly identical for the two fertilizer sources, with values of 130.0 and 129.8 kg grain kg^{-1} K_2O for SOP and MOP, respectively. These findings suggest that although both fertilizers produced comparable grain yield per unit of potassium applied, potassium sulfate produced a greater agronomic response than MOP, reflecting the synergistic contribution of sulfur to nutrient utilization and crop productivity. The economic evaluation corroborated the agronomic results. Potassium sulfate produced the highest net benefit (164,150 × 10^3 Rials ha^{-1}) and benefit–cost ratio (1.13), compared with potassium chloride, which resulted in a net benefit of 113,090 × 10^3 Rials ha^{-1} and a benefit–cost ratio of 1.09. Despite its relatively higher purchase cost, the superior yield and agronomic efficiency of SOP resulted in greater economic profitability.

Conclusion: potassium fertilization substantially enhanced wheat productivity, nutrient uptake, fertilizer use efficiency, and economic profitability under irrigated calcareous soil conditions. Although both potassium sources exhibited similar partial factor productivity, potassium sulfate consistently outperformed potassium chloride in grain yield, agronomic efficiency, and economic return. The superior performance of potassium sulfate was likely associated with its combined supply of potassium and sulfur, which improved nutrient balance and crop productivity. Therefore, potassium sulfate appears to be a suitable potassium fertilizer source for irrigated wheat cultivated on calcareous soils in northwestern Iran.

Keywords: Economic profitability, Grain yield, Nutrients, Potassium fertilizers.

مقاله پژوهشی

مقایسه کارایی سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم در بهبود تغذیه و بهره‌وری عملکرد گندم آبی با تاکید بر مصرف تقسیطی

ندا مرادی [۱*]، محمد پسندیده [۲] و مجتبی مقبلی [۳]

۱- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۲- استادیار بخش تحقیقات حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- استادیار بخش تحقیقات حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۲۰ /۰۴/ ۱۴۰۵

پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

کلمات کلیدی:

سودآوری اقتصادی،

عملکرد دانه،

عناصر غذایی،

کودهای پتاسیم

* عهده دار مکاتبات

Email: n_moradi18@yahoo.com

چکیده

پتاسیم یکی از عناصر ضروری در افزایش عملکرد و کیفیت گندم است که نقش کلیدی در بهبود کارایی مصرف آب و مقاومت به تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر مصرف تقسیطی دو منبع کود پتاسیم (سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم) بر عملکرد، اجزای عملکرد و وضعیت تغذیه‌ای گندم آبی رقم پیشگام در استان آذربایجان غربی انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار شامل: ۱) شاهد (NP) بدون مصرف پتاسیم، ۲) مصرف تقسیطی سولفات پتاسیم (SOP) و ۳) مصرف تقسیطی کلرید پتاسیم (MOP) اجرا گردید. کودهای پتاسیمی به صورت ۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد سرک در مراحل حساس رشد (پنجه‌دهی و ساقه‌دهی) مصرف شدند. نمونه‌برداری از برگ پرچم برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی انجام و در پایان فصل، عملکرد و اجزای آن تعیین گردید. نتایج نشان داد که تیمار SOP عملکرد دانه را از ۵۶۲۰ به ۶۵۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش داد (معادل ۱۵/۶۷ درصد) که نسبت به تیمار MOP (۶۲۳۰ کیلوگرم در هکتار) نیز برتری معنی‌داری داشت. همچنین، تیمار SOP باعث افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن (۱۸/۵ در صد)، پتاسیم (۲۸ در صد)، آهن، روی و منگنز برگ نسبت به شاهد گردید. علی‌رغم سطح کافی پتاسیم قابل استفاده خاک (۳۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مصرف تقسیطی کود پتاسیم در مراحل حساس رشد، عملکرد را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده زمان‌بندی

مصرف نسبت به سطح پتاسیم خاک است. به‌طور کلی، سولفات پتاسیم به دلیل تأمین همزمان گوگرد و بهبود جذب عناصر کم‌مصرف، منبع برتر تغذیه پتاسیمی برای گندم آبی توصیه می‌شود.

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی جهان و از منابع اصلی تأمین انرژی و پروتئین جمعیت انسانی است و از این رو، افزایش و پایداری عملکرد آن از مؤلفه‌های مهم امنیت غذایی به شمار می‌رود (FAO, 2023). دستیابی به عملکرد پایدار گندم، به‌ویژه در شرایط محدودیت آب و شوری، مستلزم مدیریت متعادل عناصر غذایی و تأمین کافی عناصر پرمصرف مورد نیاز گیاه است.

در میان عناصر پرمصرف، پتاسیم (K) نقش مهمی در تنظیم فعالیت آنزیم‌ها، سنتز پروتئین، تنظیم روزنه‌ای، حفظ تورژسانس سلولی و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه دارد (Marschner, 2012). همچنین، پتاسیم با تنظیم روابط آبی و نسبت Na/K می‌تواند در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های غیرزیستی، از جمله خشکی و شوری، مؤثر باشد (Wang et al., 2013; Zörb et al., 2014). کمبود این عنصر در گندم می‌تواند با کاهش رشد، ضعف ساقه، افزایش خوابیدگی و کاهش وزن دانه و عملکرد همراه باشد (Pettigrew, 2008). بنابراین، تأمین مناسب پتاسیم یکی از مؤلفه‌های مهم مدیریت تغذیه‌ای گندم، به‌ویژه در شرایط تنش محیطی، محسوب می‌شود.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تأمین مناسب پتاسیم می‌تواند اثرات منفی تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی و شوری، را در گندم کاهش دهد. Ahanger and Agarwal (2017) گزارش کردند که مصرف پتاسیم تحت تنش آبی و اسمزی، با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع اسمولیت‌هایی مانند پرولین، اسیدهای آمینه و قندها، به حفظ رشد گیاه در شرایط کمبود آب کمک می‌کند. همچنین، پتاسیم از طریق تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش سنتز ترکیبات فنلی و تانن‌ها می‌تواند تحمل گیاه به تنش‌های محیطی را بهبود بخشد (Ahanger and Agarwal, 2017). مطالعات انجام‌شده در شرایط شوری نیز نشان داده‌اند که تأمین مناسب پتاسیم با بهبود صفات زراعی و فیزیولوژیک و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تحمل گندم به شوری را افزایش می‌دهد (Alavi Matin et al., 2015; Alavi Matin et al., 2016). این یافته‌ها اهمیت مدیریت مناسب تغذیه پتاسیمی را در حفظ عملکرد گندم تحت شرایط تنش نشان می‌دهد.

با وجود اهمیت پتاسیم، پاسخ گیاه تنها به مقدار مصرف این عنصر وابسته نیست و انتخاب منبع کود پتاسیمی نیز می‌تواند بر وضعیت تغذیه‌ای و عملکرد گیاه اثرگذار باشد. دو منبع متداول پتاسیم، کلرید پتاسیم (KCl) و سولفات پتاسیم (K_2SO_4)، از نظر یون همراه و پیامدهای احتمالی آن‌ها در محیط ریشه تفاوت دارند. کلرید پتاسیم به دلیل حلالیت بالا و هزینه نسبتاً پایین، یکی از پرمصرف‌ترین منابع پتاسیم است (White and Broadley, 2001). با این حال، در شرایط شوری خاک یا آب آبیاری، مصرف این کود می‌تواند ورود کلرید به محیط ریشه را افزایش دهد و در غلظت‌های بالا، خطر تجمع کلر و آثار نامطلوب آن بر رشد و جذب برخی عناصر غذایی را افزایش دهد (Francois et al., 1986; Grattan and Grieve, 1999).

در مقابل، سولفات پتاسیم علاوه بر تأمین پتاسیم، گوگرد مورد نیاز گیاه برای سنتز ترکیبات گوگرددار را فراهم می‌کند و به دلیل نداشتن یون کلر و شاخص نمکی پایین‌تر، می‌تواند در شرایط شور یا در سامانه‌هایی که کیفیت آب آبیاری محدودیت ایجاد می‌کند، گزینه مناسبی باشد (Bungum et al., 2023). از این رو، تفاوت KCl و K_2SO_4 تنها به مقدار پتاسیم تأمین‌شده محدود نمی‌شود، بلکه نوع یون همراه می‌تواند بر شرایط محیط ریشه و در نتیجه بر جذب سایر عناصر غذایی اثرگذار باشد.

شواهد موجود نیز نشان می‌دهد که نوع منبع پتاسیم می‌تواند بر جذب عناصر غذایی اثرگذار باشد. در یک مطالعه مزرعه‌ای، مصرف K_2SO_4 در مقایسه با KCl موجب افزایش جذب نیتروژن، پتاسیم و گوگرد و همچنین افزایش جذب عناصر کم‌مصرف آهن (Fe) و منگنز (Mn) شد (International Potash Institute, 2018). با این حال، چنین نتایجی ممکن است تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، کیفیت آب آبیاری، شرایط اقلیمی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه قرار گیرد و بنابراین نمی‌توان آن‌ها را بدون ارزیابی در شرایط منطقه‌ای مختلف تعمیم داد. این موضوع به‌ویژه در خاک‌های آهکی با pH بالا اهمیت دارد، زیرا فراهمی برخی عناصر کم‌مصرف در این خاک‌ها می‌تواند محدود شود (Azadi et al., 2025).

در ایران، اهمیت مدیریت تغذیه پتاسیمی با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی و همچنین عدم تعادل مصرف عناصر غذایی بیشتر می‌شود. گزارش‌های مؤسسه بین‌المللی پتاس نشان داده‌اند که نسبت مصرف کودهای پتاسیمی به نیتروژن در کشورهای غرب آسیا و شمال آفریقا، از جمله ایران، پایین بوده است و این عدم تعادل می‌تواند کارایی مصرف کود و عملکرد محصولات را محدود کند (International Potash Institute, 2003). همچنین، مطالعات انجام شده در شرایط شوری ایران نشان داده‌اند که افزایش تأمین پتاسیم می‌تواند عملکرد گندم و غلظت برخی عناصر غذایی را افزایش داده و تجمع کلر در بافت گیاه را کاهش دهد (Malakouti et al., 2003). این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت مناسب منبع و مقدار مصرف پتاسیم در شرایط محدودیت‌های محیطی تأکید دارند.

استان آذربایجان غربی، با سطح قابل توجه کشت گندم آبی، شرایط مناسبی برای بررسی این موضوع فراهم می‌کند. بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی این منطقه دارای خاک‌های آهکی با pH نسبتاً بالا هستند که می‌تواند بر فراهمی عناصر کم‌مصرف اثر بگذارد (Azadi et al., 2025). از سوی دیگر، کاهش و بی‌نظمی بارندگی در سال‌های اخیر، اهمیت مدیریت کارآمد آب و عناصر غذایی را افزایش داده است. بنابراین، در این شرایط، انتخاب منبع پتاسیم باید علاوه بر تأمین K، با توجه به اثر احتمالی آن بر وضعیت سایر عناصر غذایی و شرایط محیط ریشه مورد ارزیابی قرار گیرد.

از سوی دیگر، پایین بودن درصد خاک‌های دارای کمبود پتاسیم قابل استفاده لزوماً به معنای عدم پاسخ گیاه به مصرف کود پتاسیمی نیست. مطالعات پهنه‌بندی در استان آذربایجان غربی نشان داده‌اند که تنها ۹/۸ درصد از اراضی نمونه‌برداری‌شده دارای پتاسیم قابل استفاده کمتر از ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده‌اند (طهرانی و همکاران، ۱۳۸۹). با این حال، پاسخ مثبت گندم به مصرف پتاسیم در برخی آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان می‌دهد که ارزیابی نیاز گیاه نمی‌تواند صرفاً بر اساس یک شاخص ثابت پتاسیم قابل استخراج خاک انجام شود. عواملی مانند ظرفیت تثبیت پتاسیم، نوع کانی‌های رسی، وضعیت رطوبت خاک، سرعت رهاسازی پتاسیم از ذخایر خاک و تغییر نیاز گیاه در مراحل مختلف رشد می‌توانند بر میزان واقعی پتاسیم در دسترس گیاه اثرگذار باشند (Römheld and Kirkby, 2010; White and Karley, 2010). از این رو، روش و زمان مصرف کود، از جمله مصرف تقسیطی، می‌تواند از طریق هماهنگ‌سازی عرضه پتاسیم با نیاز گیاه، در افزایش کارایی مصرف این عنصر مؤثر باشد (Dobermann, 2007; Havlin et al., 2016).

با وجود مطالعات متعدد درباره نقش پتاسیم در عملکرد و تحمل تنش گندم، شواهد میدانی درباره تفاوت اثر K_2SO_4 و KCl در شرایط خاک‌های آهکی و کشت گندم آبی آذربایجان غربی، به‌ویژه تحت مدیریت مصرف تقسیطی، محدود است. همچنین، مشخص نیست که آیا تفاوت این دو منبع در شرایط منطقه مورد مطالعه، علاوه بر تأمین پتاسیم، می‌تواند وضعیت تغذیه‌ای سایر عناصر، کارایی مصرف پتاسیم و بازده اقتصادی گندم را نیز تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که آیا انتخاب منبع پتاسیم، در شرایط واقعی مزرعه و تحت مصرف تقسیطی، می‌تواند موجب تفاوت در عملکرد و اجزای عملکرد، کارایی مصرف پتاسیم و وضعیت تغذیه‌ای گندم شود.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر مقایسه اثر مصرف تقسیطی سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم بر عملکرد، اجزای عملکرد، کارایی مصرف پتاسیم، وضعیت عناصر غذایی و بازده اقتصادی گندم آبی رقم پیشگام در شرایط مزرعه‌ای استان آذربایجان غربی است. نوآوری پژوهش در ارزیابی هم‌زمان پاسخ‌های زراعی، تغذیه‌ای و اقتصادی گندم به دو منبع رایج پتاسیم، تحت شرایط واقعی مزرعه و با توجه به ویژگی‌های خاک و اقلیم منطقه مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در یک مزرعه گندم آبی در شهرستان ارومیه (روستای آیبلو) مرکز استان آذربایجان غربی در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ اجرا گردید (شکل ۱). مزرعه محل اجرای پروژه واقع در روستای آیبلو شهرستان ارومیه با ۱۲۸۰ متر ارتفاع از سطح دریا، دارای میانگین بارندگی بلندمدت ۳۷۷/۷ میلی‌متر و متوسط دما ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی منطقه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ نیز ۲۲۲/۲ میلی‌متر است. بارش در این سال، نسبت به سال زراعی گذشته ۱۴۰۲-۱۴۰۳ با میانگین ۲۴۶/۳ میلی‌متر، به میزان ۹/۷۸ درصد کاهش داشت.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تیمار و در پنج تکرار انجام شد. آزمایش شامل پنج بلوک و در مجموع ۱۵ واحد آزمایشی بود و کل مساحت اجرای آزمایش نیز ۱۵۰۰ مترمربع در نظر گرفته شد. قبل از کشت محصول، از مزرعه محل اجرا یک نمونه خاک مرکب (از چند نقطه به صورت تصادفی) از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه خاک مرکب هواخشک شده و بعد از عبور از الک دو میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، بافت خاک به روش هیدرومتر، کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر، غلظت نیتروژن کل به‌روش کجلدال، فسفر قابل دسترس به‌روش اولسن و غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک به‌روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم اندازه‌گیری گردیدند (Carter and Gregorich, 2008).

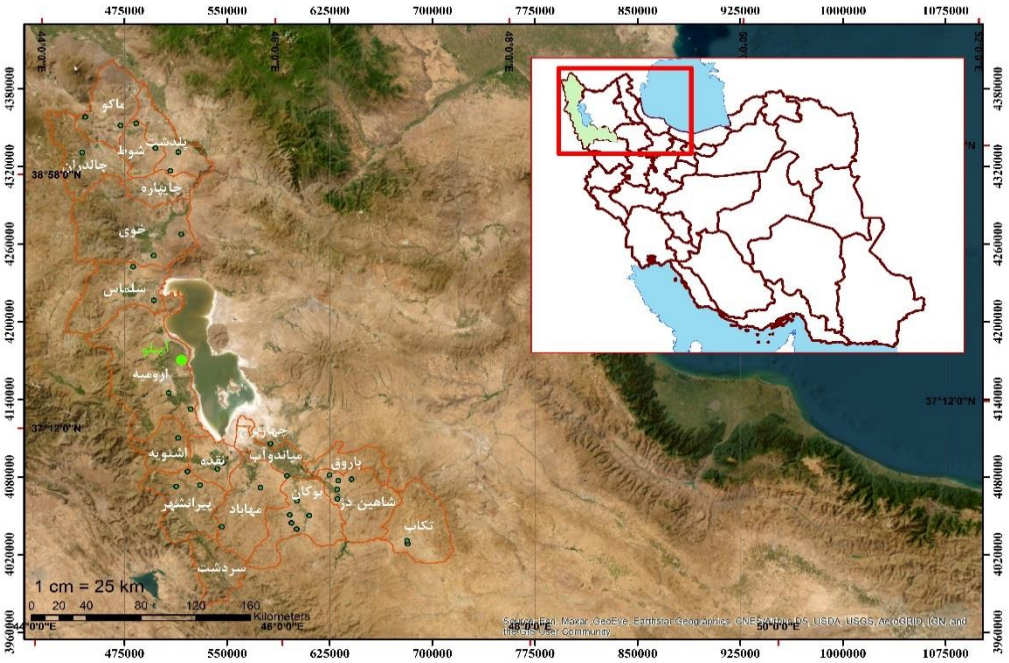


Figure (1) Geographic Location of the Experimental Site in Aibolu, Urmia, Iran

آماده سازی زمین زراعی به روش کشاورزی حفاظتی و با استفاده از خاکورز در پاییز انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه تیمار بودند: تیمار اول (NP) به صورت مصرف خاکی کودهای مورد نیاز گیاه (به‌جز کودهای پتاسیمی) براساس آزمون خاک و دستورالعمل موسسه تحقیقات خاک و آب (مشیری و همکاران، ۱۳۹۳)، تیمار دوم (SOP) شامل تیمار اول به‌علاوه مصرف پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به صورت پایه و تقسیطی (سولفات پتاسیم محلول در آب و در دو مرحله مصرف) و تیمار سوم (MOP) شامل تیمار اول به‌علاوه مصرف پتاسیم از منبع کلرید پتاسیم بود که در سه مرحله، شامل مصرف پایه و دو نوبت کودآبیاری، اعمال شد. با توجه به اینکه سولفات پتاسیم علاوه بر پتاسیم، گوگرد نیز تأمین می‌کند، اثرات مشاهده‌شده در تیمار SOP بیانگر اثر ترکیبی منبع سولفات پتاسیم و تأمین گوگرد بوده و تفکیک مستقل اثر پتاسیم از گوگرد در این آزمایش امکان‌پذیر نیست. نوع کود فسفری مورد استفاده برای مصرف پایه در مزرعه سوپرفسفات تریپل بود. مقدار مصرف کود فسفری در هر سه تیمار بر اساس نتایج آزمون خاک و با استفاده از دستورالعمل تحقیقاتی معادل ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل در زمان کاشت انجام شد. در تمامی تیمارها از کود اوره به عنوان منبع نیتروژن استفاده گردید. مقدار اوره مصرف شده در تیمارها ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار که در سه مرحله استفاده شد. در تیمار دوم (SOP) ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم در زمان کاشت و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم محلول در آب به صورت تقسیطی در دو مرحله آخر پنجه‌دهی و اواسط ساقه‌دهی هر نوبت ۲۵ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. همچنین در تیمار سوم (MOP) ۴۰ کیلوگرم در هکتار کلرید پتاسیم در زمان کاشت و ۴۰ کیلوگرم در هکتار کلرید پتاسیم به‌صورت تقسیطی در دو مرحله آخر پنجه‌دهی و اواسط ساقه‌دهی هر نوبت ۲۰ کیلوگرم در هکتار به صورت کود آبیاری استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به درصد K_2O موجود در هر کود (۵۰ درصد در SOP و ۶۰ درصد در MOP)، مقدار پتاسیم خالص مصرفی در تیمارهای SOP و MOP به ترتیب معادل ۵۰ و ۴۸ کیلوگرم K_2O در هکتار بود که اختلاف ناچیز آن (۲ کیلوگرم) در دامنه تغییرات مزرعه‌ای قابل چشم‌پوشی بوده و هر دو تیمار به عنوان مصرف ۱۰۰ درصد نیاز پتاسیمی گیاه در نظر گرفته شدند.

در مزرعه محل اجرای پروژه گندم آبی، بذر گندم پیشگام به میزان ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار در تاریخ ۲۹ مهر ۱۴۰۳ توسط ردیف کار غلات کشت شد و برداشت در تاریخ ۲۰ تیر ۱۴۰۴ انجام شد. در هنگام ظهور برگ پرچم در سطح کرت‌های آزمایشی، از هر کرت، ۵۰ برگ پرچم به‌صورت تصادفی انتخاب و پس از ترکیب، نمونه‌های برگ تهیه و پس از شستشو با آب مقطر، هوا خشک کردن و خشکاندن در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت، پودر شده و برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی به آزمایشگاه بخش خاک و آب مرکز تحقیقات استان آذربایجان غربی ارسال شد. لازم به ذکر است که سایر اقدامات به‌زراعی نظیر مبارزه با آفات و بیماری‌ها و علف‌های هرز، تاریخ، تراکم و زمان کاشت مطابق با توصیه‌های تحقیقاتی توسط زارع و با مشاوره مجری استانی اجرا شد. در راستای مبارزه با علف‌های هرز از گرانستار به میزان ۳۰ گرم در هکتار در تاریخ ۱۴۰۴/۰۱/۱۴ استفاده شد و برای مبارزه با سن گندم در مرحله سن مادری، دلتامترین (۱ لیتر در ۵۰۰ لیتر آب) مصرف شد.

در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، از هر واحد آزمایشی پنج نمونه یک مترمربعی به صورت تصادفی و کف‌بر برداشت شد و برای تعیین عملکرد و اجزای عملکرد مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی اثر تیمارهای مختلف بر کارایی تولید گندم، برخی شاخص‌های زراعی مانند کارایی زراعی پتاسیم (AEK) و کارایی جزئی مصرف پتاسیم (PFP_k^2) از طریق رابطه ۱ و ۲ محاسبه گردید.

(۱)

$$AEK=\frac{\text{(کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه در تیمار شاهد} - \text{(کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه در تیمار کودی}}{\text{مقدار پتاسیم مصرفی (کیلوگرم در هکتار)}}$$

1 Agronomic Efficiency of Potassium
2 Partial Factor Productivity of Potassium

(۲)

$$PFP_K = \frac{\text{عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)}}{\text{مقدار پتاسیم مصرفی (کیلوگرم در هکتار)}}$$

در این رابطه‌ها، مقدار پتاسیم مصرفی بر حسب کیلوگرم K_2O در هکتار است که با اعمال ضریب تبدیل KCl دارای ۶۰ درصد K_2O و K_2SO_4 دارای ۵۰ درصد K_2O محاسبه گردید. بازده مصرف پتاسیم نشان می‌دهد که به ازای مصرف هر واحد پتاسیم، چه مقدار دانه تولید شده است (Syers et al., 2008; Dobermann, 2007).

همچنین برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی در برگ پرچم، نمونه‌های مربوط پس از آماده سازی به آزمایشگاه ارسال گردید. جهت اندازه‌گیری عناصر، از روش هضم خشک استفاده گردید. نمونه‌ها ابتدا در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت خاکستر شده و سپس در HCL دو نرمال هضم گردیدند (Chapman and Pratt, 1961). در این روش ۰/۵ گرم نمونه خشک و پودر شده گیاه در کروزه یا بوته چینی ریخته و در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت پنج ساعت قرار داده شد. پس از خنک شدن ۱۰ میلی‌لیتر HCL دو نرمال اضافه گردید (Chapman and Pratt, 1961). غلظت عناصری همانند فسفر، پتاسیم و عناصر میکرو در نمونه‌های صاف شده اندازه گیری گردیدند. اندازه‌گیری نیتروژن در عصاره حاصل از هضم تر گیاهان به روش کجلدال تعیین گردید (Bremner and Breitenbeck, 1983). غلظت فسفر به روش رنگ سنجی در طول موج ۴۳۰ نانومتر از طریق اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV3100)، پتاسیم (K) توسط دستگاه فلیم‌فتومتر، آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) توسط دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu 6300 AA) در عصاره حاصل از هضم خشک اندازه‌گیری گردیدند (Planquart *et al.*, 1999).

توجیه‌پذیری اقتصادی طرح از طریق محاسبه نسبت فایده به هزینه به روش بودجه‌بندی جزئی مورد بررسی قرار گرفت. نسبت فایده به هزینه معیاری است که ارزش فعلی منافع (درآمدها) را با ارزش فعلی هزینه‌ها مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که در مقابل یک واحد هزینه، چه‌میزان منافع یا درامد ایجاد می شود. به‌منظور محاسبه نسبت فایده به هزینه از رابطه (۳) بهره گرفته می‌شود.

$$BCR = \frac{Rn + C0}{Cn + R0} \qquad (۳)$$

که در آن، BCR: نسبت فایده به هزینه (بدون واحد)، درآمد حاصل از اجرای تیمار جدید (Rn)،هزینه مربوط به تیمار شاهد که با اجرای تیمار جدید، آن هزینه ذخیره شده و در واقع به عنوان هزینه انجام نشده محسوب می‌شود که بر این اساس نوعی درآمد به حساب می آید (C0)، هزینه های ناشی از اجرای تیمارهای جدید (Cn) و درآمد از دست رفته مربوط به تیمار شاهد که در نتیجه اجرای تیمارهای جدید، از دست می‌رود (R0) است

مفهوم اقتصادی رابطه فوق به شرح زیر است:

الف. چنانچه $BCR > 1$:طرح اقتصادی است.

ب. چنانچه $BCR < 1$: طرح اقتصادی نیست.

ج. چنانچه $BCR = 1$: طرح در حالت سربه‌سر است.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تیمار شامل تیمار شاهد (NP)، سولفات پتاسیم (SOP) و کلرید پتاسیم (MOP) در پنج تکرار (بلوک) اجرا شد. برای ارزیابی عملکرد و اجزای عملکرد، از هر یک از پنج تکرار نمونه‌برداری انجام شد. اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی برگ شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و منگنز در سه تکرار انجام شد. پیش از انجام تجزیه واریانس، نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها بررسی شد. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی خاک در محدوده غیرشور قرار می‌گیرد و مقدار pH خاک برابر ۷/۷۵ نشان‌دهنده قلیایی ملایم تا متوسط بودن خاک بوده و در این محدوده، فراهمی عناصر کم‌مصرفی مانند آهن، روی و منگنز کاهش می‌یابد (Alloway, 2008). میزان آهک خاک (TNV) برابر ۱۰/۲ درصد بود که در طبقه خاک‌های نسبتاً آهکی قرار دارد. بافت خاک رسی تعیین شد که این بافت دارای ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی بالا است، اما زهکشی نسبتاً کندی دارد. پتاسیم قابل جذب خاک در طبقه کافی تا نزدیک به غنی قرار دارد (Malakouti and Homaee, 2004). با این وجود، با توجه به مصرف بالای پتاسیم توسط ارقام پرمحصول گندم و گزارش‌های مبنی بر پاسخ مثبت به مصرف کود پتاسیمی حتی در خاک‌های با پتاسیم متوسط، انجام این تحقیق برای بررسی پاسخ به منابع مختلف پتاسیم در این خاک کاملاً توجیه‌پذیر است (Römheld and Kirkby, 2010).

Table (1) Physical and Chemical Properties of the Soil at the Irrigated Wheat Experimental Field

Location	EC	pH	N_{total}	TNV	OC	Sand	Silt	Clay	Texure	P_{olsen}	$K_{available}$
	dS m^{-1}							%		mg kg^{-1}	
Urmia (Aibolu)	0.94	7.75	0.22	10.2	1.10	18	39	43	Clay	16.9	359

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان داد که کاربرد تیمارهای مورد مطالعه در گندم آبی بر عملکرد دانه، عملکرد کلش، عملکرد بیولوژیکی، تعداد خوشه در مترمربع و تعداد دانه در خوشه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود و بر وزن هزار دانه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

Table (2) Analysis of Variance (ANOVA) for the Effects of the Experimental Treatments on Grain Yield and Selected Measured Traits

Source of Variation	df	Mean square					
		Grain Yield	Straw Yield	Biological Yield	Thousand-Kernel Weight	Spikes m^{-2}	Grains $Spike^{-1}$
Replication	4	1806^{ns}	3282^{ns}	9942^{ns}	0.039^{ns}	21.77^{*}	0.056^{ns}
Treatment	2	890846^{**}	1551382^{**}	4792405^{**}	0.29^{*}	535^{**}	18.74^{**}
Error	8	19811	33768	10358	0.031	54.86	0.11
Total	14						
CV (%)		2.29	3.27	5.28	2.49	9.47	7.75

ns, *, and ** indicate non-significant and significant differences at the 5% and 1% probability levels, respectively.

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد مطالعه در گندم آبی نشان داد که تیمار دوم (SOP) و سوم (MOP) در تمامی شاخص‌های عملکردی شامل عملکرد دانه، عملکرد کلش، عملکرد بیولوژیکی، وزن هزار دانه، تعداد خوشه در مترمربع و تعداد دانه در خوشه در مقایسه با تیمار اول (NP) افزایش یافتند (جدول ۳). بطوری‌که میزان عملکرد دانه در تیمارهای SOP و MOP در مقایسه با تیمار NP به ترتیب ۱۵/۶۷ و ۱۰/۸۵ درصد افزایش یافت. علیرغم بالا بودن پتاسیم قابل‌استفاده خاک (۳۵۹ میلی‌گرم در کیلوگرم)، مصرف پتاسیم موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط این آزمایش، مقدار پتاسیم قابل‌استفاده خاک به‌تنهایی نتوانسته است پاسخ عملکردی گندم به مصرف پتاسیم را به‌طور کامل تبیین کند. احتمالاً زمان‌بندی مصرف و تأمین پتاسیم در مراحل حساس رشد، در کنار سایر عوامل مؤثر بر جذب و نیاز گیاه، در این پاسخ نقش داشته است (Römheld and Kirkby, 2010). این تناقض با دو عامل قابل توجیه است: اول، اوج نیاز پتاسیم گندم در مراحل حساس فنولوژیک (پنجه‌دهی، ساقه‌دهی و پر شدن دانه) که در آن پتاسیم نقش کلیدی در انتقال مواد فتوسنتزی به دانه ایفا می‌کند (Zörb et al., 2014; Marschner, 2012). دوم، احتمالاً استراتژی تقسیط کود در تیمارهای SOP و MOP در مراحل حساس رشد که با همزمان‌سازی عرضه پتاسیم با نیاز گیاه، کارایی جذب را افزایش داد (Havlin et al., 2016)، و در نتیجه عملکرد دانه را نسبت به شاهد افزایش داده است.

عملکرد کلش نیز در این تیمارها به‌ترتیب ۱۴/۵۷ و ۹/۷۵ درصد در مقایسه با NP افزایش داشت. همچنین مقدار عملکرد بیولوژیکی در تیمارهای SOP و MOP به ترتیب ۱۴/۱۶ و ۹/۵۲ درصد نسبت به NP بود (شکل ۲). نتایج نشان داد، مصرف کودهای پتاسیمی (سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم) به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و اجزای عملکرد گندم آبی را نسبت به تیمار بدون مصرف پتاسیم (NP) افزایش داد. بیشترین افزایش عملکرد دانه (۱۵/۶۷ درصد) در تیمار سولفات پتاسیم مشاهده شد که حاکی از برتری نسبی این منبع پتاسیم نسبت به کلرید پتاسیم (MOP) بود. این یافته با نتایج Zörb و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد که نشان دادند پتاسیم با بهبود انتقال مواد به دانه و افزایش کارایی مصرف آب، عملکرد گندم را در شرایط دیم و آبی افزایش می‌دهد. همچنین Römheld and Kirkby (2010) تأکید کردند که پتاسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در فعال‌سازی بیش از ۶۰ آنزیم گیاهی، نقش مستقیمی در سنتز پروتئین و انتقال قندها به دانه دارد.

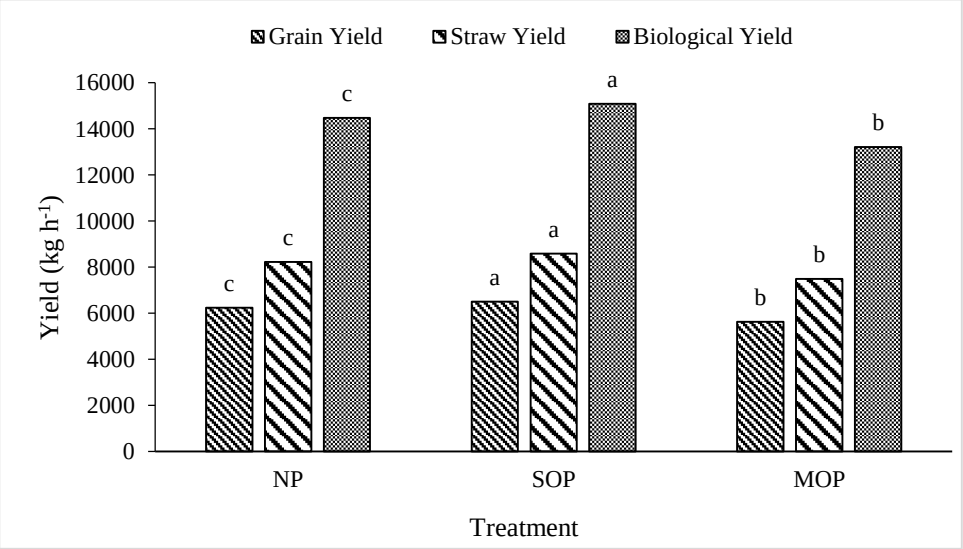


Figure (2) Effects of the experimental treatments on grain yield, straw yield, and biological yield.
Means followed by at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level.

وزن هزار دانه و تعداد خو شه در متربع در تیمارهای SOP و MOP از لحاظ آماری بی‌شتر از تیمار NP بود. اما تیمارهای SOP و MOP از لحاظ آماری با هم اختلاف معنی‌دار ندا شتند (جدول ۳). بی‌شترین و کمترین تعداد خو شه در متر مربع به ترتیب در تیمار SOP و NP م‌شاهده شد. مصرف پتاسیم باعث افزایش معنی‌دار تعداد خوشه در مترمربع و تعداد دانه در خوشه شد، ولی اختلاف بین دو منبع پتاسیم معنی‌دار نبود. این مو ضوع نشان می دهد که پتا سیم بی‌شتر بر اجزای عملکردی مرتبط با مراحل زایشی اولیه (تشکیل خو شه و دانه) تأثیر می گذارد تا مرحله پرشـدن دانه. پتیگرو (Pettigrew, 2008) نیز گزارش کرد که کمبود پتاسـیم به ویژه در مرحله سـاقه‌دهی و گلدهی، تعداد دانه در خوشـه را کاهش می‌دهد، زیرا انتقال کربوهیدرات‌ها به سنبله مختل می‌شود. بطور کلی تمام تیمارهای آزمایشی سبب بهبود معنی‌دار عملکرد گندم آبی در مقایسه با تیمار اول (NP) شدند. اما تاثیر تیمار SOP بیشتر بود. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که مصرف کودهای پتا سیمی، به ویژه در تیمار SOP، باعث بهبود عملکرد گندم آبی در شـرایط مزرعه‌ای شـده و می‌تواند به عنوان راهکار مؤثر در مدیریت تغذیه گیاه و افزایش بهره‌وری محصول پیشنهاد شود. این اثر مثبت ممکن است ناشی از نقش پتاسیم در افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تعادل آب و مواد غذایی و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی باشد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای مورد مطالعه بر درصد نیتروژن، درصد پتاسیم، غلظت آهن، روی و منگنز برگ گندم آبی معنی‌دار بود اما اثر تیمارها بر درصد فسفر گندم از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴).

مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت عناصر غذایی در برگ گندم آبی در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد کاربرد پتاسیم در تیمار SOP و MOP سبب افزایش معنی‌دار درصد نیتروژن گندم به ترتیب به میزان ۱۸/۵۰ و ۱۳/۷۸ درصد در مقایسه با تیمار NP گردید. این افزایش احتمالاً ناشی از نقش پتاسیم در بهبود جذب نیترات و فعال‌سازی آنزیم نیترات ردوکتاز است (Marschner, 2012). در مورد فسـفر برگ، اگرچه درصـد آن در تیمارهای SOP و MOP نسـبت به تیمار NP افزایش یافت، این تغییر از نظر آماری معنی‌دار نبود، که حاکی از محدود بودن اثر پتا سیم بر جذب فسفر در شرایط مزرعه‌ای ا ست. اگرچه غلظت فسفر برگ نیز روند افزایشی دا شت، اما این افزایش معنی‌دار نبود، که ممکن است به دلیل تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی منطقه باشد. یافته مشابهی توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) در خاک‌های آهکی چین گزارش شـده اسـت. درصـد پتاسـیم برگ نیز با مصـرف کودهای پتاسـیمی افزایش یافت، هرچند اختلاف بین SOP و MOP از نظر آماری معنی‌دار نبود، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ولی مشابه هر دو روش بر جذب پتاسیم است.

Table (3) Mean Comparison of the Effects of the Experimental Treatments on Thousand-Kernel Weight, Spike Density, and Number of Grains per Spike in Wheat

Treatment	Thousand-Kernel Weight (g)	Spikes m^{-2}	Grains $Spike^{-1}$
NP	40.10 [b]	411 [b]	42 [c]
SOP	40.38 [a]	431 [a]	45.5 [a]
MOP	40.43 [a]	425 [a]	43.7 [b]

Means within each column sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test ($P \leq 0.05$).

Table (4) Analysis of Variance (ANOVA) for the Effects of the Experimental Treatments on Nutrient Concentrations in Wheat Flag Leaves

Source of Variation	df	Mean square					
		N	P	K	Fe	Zn	Mn
Replication	2	0.0094^{ns}	0.0001^{ns}	0.032^{ns}	2.19^{ns}	0.56^{ns}	0.93^{ns}
Treatment	2	0.048^{*}	0.00007^{ns}	0.211^{*}	2263^{**}	13.41^{*}	72.29^{**}
Error	4	0.0038	0.00004	0.018	0.44	1.027	0.75
Total	8						
CV (%)		2.73	3.35	5.83	3.2	5.14	4.86

ns, *, and ** indicate non-significant and significant differences at the 5% and 1% probability levels, respectively.

Table (5) Mean Comparison of the Effects of the Experimental Treatments on Nutrient Concentrations in Wheat Flag Leaves

Treatment	N	P	K	Fe	Zn	Mn
	(%)			(mg kg^{-1})		
NP	2.54 [b]	0.19 [a]	2.0[b]	85.2 [c]	17.81[b]	13.9 [c]
SOP	3.01 [a]	0.23 [a]	2.56 [a]	126.5 [a]	21.10 [a]	23.3 [a]
MOP	2.89 [a]	0.21 [a]	2.45 [a]	94.83 [b]	20.52 [a]	16.5 [b]

Means within each column sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test ($P \leq 0.05$).

بطور کلی کاربرد کود پتاسیم در تیمارهای SOP و MOP سبب افزایش غلظت عناصر کم مصرف شامل آهن، روی و منگنز برگ گندم آبی نسبت به تیمار NP (بدون کاربرد پتاسیم) گردید. در این بین اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای SOP و MOP بر غلظت روی برگ گندم وجود نداشت. اما بیشترین غلظت آهن و منگنز در تیمار SOP بود که به ترتیب در مقایسه با تیمار NP سبب افزایش ۱/۴۸ برابر و ۶۷/۶۲ درصد گردید. این افزایش‌ها می‌تواند ناشی از بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌ها و تقویت فرآیندهای جذب و انتقال عناصر کم‌مصرف باشد. همچنین این پدیده را می‌توان به کاهش رقابت یونی بین پتاسیم و دیگر کاتیون‌ها، افزایش ترشح ریشه و اسیدیفیکاسیون ریزوسفر نسبت داد (White and Karley, 2010). نتایج این پژوهش با یافته های مطالعات پیشین نیز مطابقت داشت که نشان داده‌اند کاربرد کودهای پتاسیمی، علاوه بر بهبود برخی صفات فیزیولوژیک، موجب کاهش تجمع کادمیم در دانه گندم شده و نقش مؤثری در بهبود وضعیت تغذیه ای گیاه و کاهش جذب عناصر سنگین به ویژه کادمیم در دانه دارد (Larki et al., 2015a). همچنین، مصرف پتاسیم می‌تواند الگوی توزیع کادمیم را در اندام‌های مختلف گندم تغییر داده و تجمع آن در دانه را کاهش دهد (Larki et al., 2015b). اگرچه در پژوهش حاضر غلظت کادمیم اندازه‌گیری نشد، ولی بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه در تیمارهای پتاسیمی، به‌ویژه تیمار سولفات پتاسیم، با نتایج مطالعات قبلی مطابقت داشته و اهمیت مدیریت تغذیه پتاسیمی را در ارتقای عملکرد و کیفیت محصول نشان می دهد. همچنین سولفات موجود در کود SOP علاوه بر کاهش pH ریزوسفر، گوگرد موجود در کود سولفات پتاسیم (SOP) می‌تواند از طریق مکانیسم‌های بیوشیمیایی دیگری نیز جذب عناصر کم‌مصرف به ویژه آهن و روی را افزایش دهد. شواهد نشان می‌دهد که تأمین گوگرد کافی برای گیاه، سنتز ترکیبات آلی گوگرددار نظیر فیتوسیدروفورها را تحریک می‌کند. این ترکیبات با قدرت کلات کنندگی بالا، قادر به انحلال و جذب آهن و روی از فاز جامد خاک‌های آهکی هستند (Marschner, 2012). همچنین، حضور یون سولفات در ناحیه ریشه می‌تواند ترشح اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک و اسید مالیک از ریشه را افزایش دهد که ضمن اسیدیفیکاسیون موضعی ریزوسفر، به آزادسازی عناصر کم‌مصرف از کانی‌های کربناته کمک می‌کند (Havlin et al., 2016). این سازوکارها می‌توانند تا حدی افزایش غلظت آهن و روی در تیمار SOP نسبت به تیمار شاهد و MOP را توضیح دهند. با این حال، از آنجا که غلظت کلر در خاک و اندام گیاهی در این پژوهش اندازه‌گیری نشد، نمی‌توان تفاوت مشاهده شده بین منابع پتاسیمی را به‌طور قطعی به اثر کلر نسبت داد. بنابراین، نقش احتمالی یون همراه منابع پتاسیمی در تغییر جذب عناصر کم‌مصرف نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

نتایج محاسبه بازده کارایی زراعی پتاسیم (AEK) و کارائی جزئی مصرف پتاسیم (PEP_K) در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می شود، تیمار سولفات پتاسیم (SOP) با مقدار ۱۳۰ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم K_2O مصرفی و تیمار کلرید پتاسیم (MOP) با مقدار ۱۲۹/۸کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم K_2O مصرفی، از نظر شاخص PEP_K عملکرد بسیار مشابهی داشتند که نشان‌دهنده کارایی تقریباً یکسان دو منبع پتاسیم در تبدیل پتاسیم مصرفی به عملکرد دانه است. در مقابل، شاخص AEK تفاوت محسوسی بین دو تیمار نشان داد؛ به‌طوری‌که تیمار SOP با مقدار ۱۷/۶ کیلوگرم دانه به ازای هر

کیلوگرم K_2O مصرفی نسبت به تیمار MOP با مقدار ۱۲/۷۱کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم K_2O مصرفی، حدود ۳۸ درصد کارایی زراعی بیشتری داشت. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش عملکرد حاصل از مصرف پتاسیم در تیمار سولفات پتاسیم بیشتر از کلرید پتاسیم بوده است. بنابراین، برتری عملکرد دانه در تیمار SOP را می‌توان علاوه بر تأمین پتاسیم، به تأمین همزمان گوگرد و بهبود جذب سایر عناصر غذایی، به‌ویژه آهن و منگنز، نسبت داد که در نهایت موجب افزایش پاسخ گیاه به مصرف کود پتاسیمی شده است (Havlin et al., 2016; Zhao et al., 2006).

مقادیر PEP_K محاسبه‌شده در این تحقیق به طور قابل‌توجهی بالاتر از محدوده گزارش‌شده توسط رومهلد و کرکبی (Römheld and Kirkby, 2010) یعنی بین ۶۰ تا ۸۰ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم K_2O است. این برتری نشان‌دهنده کارایی بالای مدیریت تغذیه پتاسیم در این پژوهش است که احتمالاً به چند عامل نسبت داده می‌شود؛ نخست، کاربرد تقسیطی کودهای پتاسیمی و همزمان‌سازی مصرف آن‌ها با مراحل حساس رشد گیاه که موجب افزایش هماهنگی بین عرضه و تقاضای پتاسیم گردید (Dobermann, 2007). دوم، استفاده از رقم پرمحصول پیشگام با ظرفیت بالای تولید و جذب عناصر غذایی. سوم، شرایط مناسب آبیاری و مدیریت مطلوب زراعی که امکان بروز حداکثر پتانسیل عملکرد را فراهم کرد. چهارم، بافت رسی خاک و ظرفیت بالای نگهداری پتاسیم که سبب کاهش تلفات ناشی از آبشویی و افزایش فراهمی این عنصر برای گیاه شد. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت صحیح زمان و روش مصرف کودهای پتاسیمی می‌تواند بهره‌وری مصرف پتاسیم را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

همچنین ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) در خاک‌های آهکی چین گزارش کردند که بهره‌وری مصرف پتاسیم در تیمار سولفات پتاسیم به‌طور متوسط ۱۵ درصد بیشتر از تیمار کلرید پتاسیم بود. در پژوهش حاضر نیز اگرچه مقادیر PEP_K در دو منبع کود تقریباً یکسان بود (۱۳۰ و ۱۲۹/۸ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم K_2O)، اما شاخص AEK برتری سولفات پتاسیم را به‌خوبی نشان داد؛ به‌طوری‌که افزایش عملکرد ناشی از مصرف کود در تیمار SOP به‌مراتب بیشتر از تیمار MOP بود. این موضوع نشان می‌دهد که هرچند هر دو منبع از نظر تولید دانه به ازای واحد پتاسیم مصرفی عملکرد مشابهی داشتند، اما سولفات پتاسیم توانست پاسخ عملکردی بیشتری نسبت به شاهد ایجاد کند. احتمالاً ویژگی‌های خاک مورد مطالعه (بافت رسی، pH قلیایی و آهک نسبتاً بالا) همراه با مصرف تقسیطی کود، موجب کاهش تفاوت بین دو منبع از نظر شاخص PEP_K شده است، در حالی که احتمالاً تأمین همزمان گوگرد در تیمار سولفات پتاسیم و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه، از جمله جذب برخی ریزمغذی‌ها، می‌تواند در افزایش عملکرد دانه و در نتیجه برتری AEK این تیمار نقش داشته باشد. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط خاک‌های آهکی و تحت مدیریت تقسیطی کود، AEK شاخص مناسب‌تری برای مقایسه پاسخ گیاه به منابع مختلف پتاسیم نسبت به PEP_K است، زیرا تغییرات واقعی عملکرد ناشی از مصرف کود را بهتر منعکس می‌کند.

یافته‌های این تحقیق در زمینه برتری سولفات پتاسیم بر کلرید پتاسیم، از لحاظ عملکرد با نتایج مطالعات پیشین در داخل کشور نیز همسو است. در مطالعه‌ای در استان کردستان، کمانگر و همکاران (۱۴۰۳) گزارش کردند که مصرف تقسیطی سولفات پتاسیم (۳۳ درصد پایه و ۶۷ درصد سرک محلول) در گندم دیم، بیشترین عملکرد دانه (۴۴۷۲ کیلوگرم در هکتار) و غلظت پتاسیم دانه را به همراه داشت. همچنین صادقی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱) در منطقه کهنوج کرمان نشان دادند که مصرف تقسیطی سولفات پتاسیم محلول، ضمن افزایش ۳۱ درصدی عملکرد، کارایی مصرف آب را به طور چشمگیری بهبود بخشید. این پژوهش‌ها همگی حاکی از نقش مؤثر سولفات پتاسیم، به ویژه در سیستم‌های مصرف تقسیطی و همزمان با مراحل حساس رشد، در بهبود عملکرد و کارایی مصرف عناصر غذایی در گندم می‌باشند.

Table (6) Effects of the Experimental Treatments on Potassium Use Efficiency Indices in Wheat

Treatment	Applied Fertilizer Rate (kg ha^{-1})	Applied K_2O Rate (kg ha^{-1})	Grain Yield (kg ha^{-1})	AEK	PEP_K
NP	0	0	5620	-	-
SOP	100	50	6500	17.6	130
MOP	80	48	6230	12.71	129.8

ارزیابی اقتصادی

برای ارزیابی اقتصادی تیمارها، هزینه کودهای شیمیایی مصرف‌شده در هر تیمار، شامل کودهای اوره، سوپرفسفات تریپل، سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم، بر اساس قیمت‌های سال ۱۴۰۴ محاسبه شد. هزینه سایر عملیات زراعی شامل آماده‌سازی زمین، کاشت، آبیاری، کنترل علف‌های هرز و آفات و برداشت، به دلیل یکسان بودن در تمامی تیمارها، در تحلیل مقایسه‌ای لحاظ نشد. درآمد حاصل از تولید دانه نیز بر اساس عملکرد هر تیمار و قیمت ۲۰۵۰۰ تومان به ازای هر کیلوگرم گندم محاسبه شد. سپس با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی، تغییرات هزینه و درآمد تیمارهای پتاسیمی نسبت به تیمار شاهد مقایسه و نسبت منفعت به هزینه محاسبه شد. جمع هزینه‌های مربوط به مصرف کود شیمیایی در تیمار اول بدون مصرف کود پتاسیم ۲۶۹۰۰ هزار ریال و در تیمارهای SOP و MOP به ترتیب به مبلغ ۴۳۱۵۰ و ۳۸۸۶۰ هزار ریال می‌باشد. برای تعیین اقتصادی بودن یا نبودن تیمارهای کودی اعمال شده و نیز مشخص نمودن سودآورترین تیمار کودی نسبت به شاهد از نسبت منفعت به هزینه و روش بودجه‌بندی جزئی استفاده شد (جدول ۷).

با توجه به نتایج جدول ۷، منافع در تیمارهای کودی SOP و MOP بیشتر از هزینه‌های انجام شده در تیمار اول (بدون کاربرد کود پتاسیم) است. به عبارت دیگر، نسبت سود به هزینه در این تیمارها بیش از یک می‌باشد و بنابراین هر دو تیمار در مقایسه با تیمار اول، سودآورتر هستند. با این حال تیمار SOP بالاترین سودآوری را برای زارع داشت. از منظر اقتصادی، هر دو تیمار پتاسیمی دارای نسبت فایده به هزینه بیشتر از یک بودند که بیانگر سودآوری مصرف کود پتاسیم در شرایط مزرعه مورد مطالعه است. هرچند تفاوت عملکرد بین SOP و MOP از نظر آماری در برخی صفات معنی‌دار نبود، اما سودآوری بالاتر تیمار SOPآن را به گزینه برتر برای زارع تبدیل می‌کند. این موضوع با توصیه‌های FAO (2020) مبنی بر اولویت‌دهی به کودهای حاوی گوگرد در خاک‌های آهکی و کم‌مصرف همسو است.

Table (7) Comparison of the Experimental Treatments Using Partial Budget Analysis

Treatment			Cost/Benefit (×10^3 Rials ha^{-1})	Net Benefit (×10^3 Rials ha^{-1})	Benefit–Cost Ratio
SOP	Benefit	Rn + C0	1359400	164150	1.13
	Cost	Cn + R0	1195250		
MOP	Benefit	Rn + C0	1304050	113090	1.09
	Cost	Cn + R0	1190960		

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشـــان داد که در شـــرایط مزرعه مورد مطالعه، مصـــرف کود پتاســـیمی موجب بهبود عملکرد و برخی شاخص‌های تغذیه‌ای گندم آبی رقم پیشگام نسبت به تیمار شاهد شد. در میان منابع مورد بررسی، تیمار سولفات پتاسیم (SOP) عملکرد دانه و برخی شاخص‌های تغذیه‌ای بالاتری نسبت به کلرید پتاسیم (MOP) داشت. همچنین نتایج مربوط به تجزیه گیاه نشان داد که کاربرد سولفات پتاسیم نسبت به تیمار شاهد، غلظت نیتروژن برگ را ۱۸/۵ درصد و غلظت منگنز را ۶۷/۶ درصد افزایش داد که این امر می‌تواند با تأمین همزمان گوگرد در تیمار SOP و تفاوت یون همراه دو منبع پتاسـیم مرتبط باشـد؛ با این حال، به دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم کلر و مکانیسم‌های جذب عناصر، نمی‌توان نقش قطعی این عوامل را تعیین کرد. از منظر اقتصادی، نسبت فایده به هزینه در تیمار سولفات پتاسیم بیشتر از تیمار کلرید پتاسیم بود که نشان‌دهنده سودآوری بالاتر مصرف سولفات پتاسیم برای زارع است. اگرچه هر دو منبع پتاسیم نسبت به تیمار شاهد سودآور بودند، اما تیمار SOP با منفعت خالص بیشتر، گزینه برتر اقتصادی محسوب می‌گردد. به طور کلی، سولفات پتاسیم به دلیل تأمین همزمان پتاسیم و گوگرد، عدم وجود یون کلر و شاخص نمکی پایین‌تر، تأثیر بیشتری بر بهبود وضعیت تغذیه‌ای، افزایش عملکرد و ارتقای بهره‌وری اقتصادی گندم آبی در شـــرایط مزرعه مورد مطالعه داشـــت. با توجه به نتایج به‌دســـت‌آمده، به منظور افزایش پایداری تولید و مدیریت بهینه مصـــرف کود در مزارع گندم آبی اســـتان آذربایجان غربی، اســـتفاده از کود ســـولفات پتاســـیم به روش توأم خاکی (نواری) و کودآبیاری توصـیه می‌گردد. گرچه پروژه پژوهشـی در سـه سـال زراعی اجرا شـده اسـت، مقاله حاضـر تنها نتایج سـال زراعی ۱۴۰۳–۱۴۰۴ را گزارش می‌کند. بنابراین، بررسی و تلفیق نتایج سایر سال‌های اجرای پروژه برای ارزیابی پایداری پاسخ گندم به منابع مختلف پتاسـیم و افزایش قابلیت تعمیم نتایج در سـطح منطقه پیشـنهاد می‌شـود. به عنوان یک محدودیت تحقیق، در این مطالعه غلظت یون کلر در خاک و برگ اندازه‌گیری نشد. با توجه به مصرف کلرید پتاسیم، انجام مطالعات تکمیلی که به طور همزمان اثرات تجمع کلر بر فراهمی عناصـر غذایی، کیفیت دانه و عملکرد گندم را در خاک‌های با بافت سـنگین و زهکشـی محدود بررسی نمایند، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، شاخص‌هایی مانند نسبت K/Cl در برگ و هدایت الکتریکی عصـاره اشـباع خاک در طول فصـل رشـد پایش شـوند تا بتوان اثرات منفی احتمالی کلر را با دقت بیشتری تفکیک نمود.

References

Ahanger, M. A., & Agarwal, R. M. (2017). Potassium up-regulates antioxidant metabolism and alleviates growth inhibition under water and osmotic stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Protoplasma, 254*(4), 1471–1486. https://doi.org/10.1007/s00709-016-1048-6

Alavi Matin, S. M., Rahnama, A., & Meskarbashee, M. (2015). Effects of type and rate of potassium fertilizer on agronomic and physiological traits of two durum wheat varieties under salt stress. Cereal Research, 5(2), 177–187.

Alavi Matin, S. M., Rahnama, A., & Meskarbashee, M. (2016). Effect of potassium supply on the activity of some antioxidant enzymes of two durum wheat cultivars under salt stress. Plant Productions, 38(4), 1–12. https://doi.org/10.22055/ppd.2016.11828

Alloway, B. J. (Ed.). (2008). *Micronutrient deficiencies in global crop production*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7

Azadi, A., Shakeri, S., & Azadi, H. (2025). Impact of different land uses on potassium forms and soil properties: The case of southwestern Iran. *Environment, Development and Sustainability, 27*(10), 25815–25840. https://doi.org/10.1007/s10668-025-06476-4

Bremner, J. M., & Breitenbeck, G. A. (1983). A simple method for determination of ammonium in soil extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 14*(10), 905–913. https://doi.org/10.1080/00103628309367350.

Bungum, P. O., Rhoades, J. T., Currier, D., & Bradsher, A. (2023). *Technical report on potassium chloride for crop production*. USDA National Organic Program.

Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2008). *Soil sampling and methods of analysis* (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420005271

Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1961). *Methods of analysis for soils, plants and waters*. University of California, Division of Agricultural Sciences.

Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency: Measurement and management. In *IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices* (pp. 1–28). International Fertilizer Industry Association.

FAO. (2020). *Global soil organic carbon map*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2023). *World food and agriculture: Statistical yearbook 2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc8166en

Francois, L. E., Maas, E. V., Donovan, T. J., & Youngs, V. L. (1986). Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination of semi-dwarf and durum wheat. *Agronomy Journal, 78*(6), 1053–1058. https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800060002x

Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1999). Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae, 78*(1–4), 127–157. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00192-7

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson.

International Potash Institute. (2003). *Potassium and water management in West Asia and North Africa: Proceedings of the IPI Regional Workshop (5–6 November 2001, Amman, Jordan).* International Potash Institute.

International Potash Institute. (2018). *Macro- and micronutrient uptake rates as a function of fertilizer treatments*. International Potash Institute.

Kamangar, A., Malakouti, M. J., Sedri, M. H., & Si-o-Seh-Mardeh, A. (2024). Effects of potassium and zinc fertilizer management on the quantitative and qualitative characteristics of rainfed wheat. *Plant Processes and Function, 13*(62), 301–330. [in Persian with English Abstract]

Larki, S., Rahnama, A., & Aynehband, A. (2015a). Effect of application of potassium fertilizers on physiological traits and cadmium accumulation in grain of two durum wheat (Triticum turgidum ssp.

Durum (Desf.) Husn.) cultivars. Iranian Journal of Crop Sciences, 17 (3), 223-235. http://agrobreedjournal.ir/article-1-553-en.html

Larki, S., Rahnama, A. & Aynehband, A. (2015b). The effect of potassium on cadmium distribution and accumulation in differen t organs of durum wheat. Plant Productions, 38(3), 79-92. https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11455

Malakouti, M. J., & Homaee, M. (2004). Determination of critical levels of soil micronutrients for dryland wheat in the northwest of Iran. *Journal of Agricultural Sciences, 10*(2), 45–56.

Malakouti, M. J., et al. (2003). Crop yield and water use efficiency as affected by potassium fertilization. In *Proceedings of the IPI Regional Workshop on Potassium and Water Management in West Asia and North Africa* (pp. 76–83). International Potash Institute.

Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9

Moshiri, F., Khademi, Z., Saadat, S., Rashidi, N., & Shahabi, A. A. (2014). *Integrated soil fertility and nutrient management guide for wheat.* Soil and Water Research Institute Publication. [In Persian]

Pettigrew, W. T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum, 133*(4), 670–681. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01073.x

Planquart, P., Bonin, G., Prone, A., & Massiani, C. (1999). Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts. *Science of the Total Environment, 241*(1–3), 161–171. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00331-2

Römheld, V., & Kirkby, E. A. (2010). Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. *Plant and Soil, 335*(1–2), 155–180. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1

Sadeghifard, M., Malakouti, M. J., Jalali, V. R., & Zare, A. A. (2022). Effect of potassium sulfate solution containing zinc chelate on increasing grain yield and reducing water consumption of wheat in Kahnooj region (Kerman Province). *Plant Processes and Function, 11*(49), 63–74. [in Persian with English Abstract]

Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No. 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Tehrani, M. M., Pasandideh, M., Majidi, A., Solhi, M., Ghaderi, J., Azari, K., Cherati-Araei, A., Mahboub Khamami, A., Davatgar, N., et al. (2010). *Determination of the distribution and fertilizer recommendation of micronutrients in irrigated agricultural lands of Iran (Phase I): Final research report.* Soil and Water Research Institute. [In Persian]

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences, 14*(4), 7370–7390. https://doi.org/10.3390/ijms14047370

White, P. J., & Broadley, M. R. (2001). Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Annals of Botany, 88*(6), 967–988. https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1540

White, P. J., & Karley, A. J. (2010). Potassium. In U. Hell & R.-R. Mendel (Eds.), *Cell biology of metals and nutrients* (pp. 199–224). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10613-2_9

Zhang, X., et al. (2017). Potassium fertilization affects wheat yield and quality in calcareous soils. *Field Crops Research, 212*, 102–110. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.021

Zhao, F. J., Salmon, S. E., Withers, P. J., Monaghan, J. M., Evans, E. J., Shewry, P. R., & McGrath, S. P. (2006). Variation in the breadmaking quality and nutritional attributes of wheat in relation to sulfur nutrition. *Journal of Cereal Science, 44*(1), 111–119. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.01.008

Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture—Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology, 171*(9), 656–669. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008