

Effects of Mealworm Frass Application and Zinc Lignosulfonate Foliar Spraying on Quantity and Quality of Wheat Grain

Niloufar Mirzababaei¹ , Akbar Hassani^{2✉} , Ahmad Golchin³ , Mohammad Babaakbari Sari⁴ 

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: niloufar.mb@znu.ac.ir

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: akbar.hassani@znu.ac.ir

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: babaakbari@znu.ac.ir

4-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: agolchin@znu.ac.ir

Received: August 30, 2025

Revised: September 27, 2025

Accepted: October 12, 2025

Published: October 21, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Enhancing the quality of food grains is a central goal of sustainable agriculture. Wheat, as one of the most widely cultivated crops globally, plays a critical role in food security. Despite its importance, limited research has examined the impact of mealworm (*Tenebrio molitor*) frass on wheat plant growth and yield. Given Iran's diverse soil and climatic conditions, its strong potential for cereal production, and the associated economic considerations, investigating the use of organic fertilizers in wheat cultivation is both timely and necessary. Similarly, the foliar application of zinc chelates, particularly zinc lignosulfonate, remains underexplored in cereal crops. This study aims to evaluate the effects of foliar-applied zinc lignosulfonate and soil-applied mealworm frass on wheat growth, yield components, and the molar ratio of phytic acid to zinc in the grain of wheat.

Materials and Methods

In this study, to investigate the effect of different levels of mealworm frass and foliar-applied zinc lignosulfonate on growth characteristics, yield, element concentrations, and the molar ratio of phytic acid to zinc, a factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design with three replications. The treatments included four levels of mealworm frass (0, 500, 1000, and 1500 kg/ha) and three foliar zinc treatments applied during the flowering period: control (spraying with irrigation water), and foliar applications of zinc lignosulfonate at 2.5 and 5 mg/L. The following growth and yield indices were measured: grain yield, straw yield, plant height, and number of fertile spikes per meter, number of grains per spike, spike length, and 1000-grain weight. The concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, zinc, and iron in wheat grain were determined. The molar ratio of phytic acid to zinc in the grain was also measured.

Results

The highest grain yield (17.5 t/ha) and straw yield (2.75 t/ha) were obtained from the treatment receiving 1500 kg ha⁻¹ mealworm frass combined with 5 mg/L zinc lignosulfonate foliar spraying, representing increases of 43% and 93% compared with the control, respectively. Also, the same treatment also produced the highest 1000-grain weight (43.33 g) and the greatest number of fertile spikes (335 per meter), while the lowest number of fertile spikes (218 per meter) was observed in the control (no frass, no zinc), which was significantly lower than the other treatments. Mealworm frass increased the molar ratio of phytic acid to

zinc, whereas foliar application of zinc lignosulfonate decreased it. In addition, the highest ratio of phytic acid to zinc was recorded with 1500 and 1000 kg/ha frass (21.55 and 21.15, respectively), which was not significantly different from each other, and the lowest ratio (19.97) occurred with zero frass and was significantly lower than the other treatments. Application of 1500 kg/ha mealworm frass increased zinc concentration of wheat grain by 43%, 27%, and 24% compared with the control, 500, and 1000 kg frass treatments, respectively. The foliar application of 5 mg/L zinc lignosulfonate increased grain zinc concentration by 34% and 25% compared with the control and 2.5 mg/L treatments, respectively. The 1500 kg frass treatment increased grain phosphorus concentration by 81%, 62%, and 37% compared with the control, 500 kg/ha and 1000 kg/ha treatments, respectively. There was no significant difference in grain potassium between the 0 and 500 kg/ha frass treatments. However, 1500 kg/ha frass increased grain potassium by 48%, 41%, and 14% compared with the control, 500 kg/ha, and 1000 kg/ha treatments, respectively. Grain nitrogen concentration was also increased by 81%, 62%, and 37% with 1500 kg/ha frass compared with the control, 500 kg/ha, and 1000 kg/ha frass, respectively. Neither the main nor interaction effects of the treatments had a significant impact on wheat grain iron concentration.

Conclusion

Based on the results of this study, application of mealworm frass and foliar zinc lignosulfonate substantially improved wheat performance and grain nutritional quality. In particular, the combined treatment of 1500 kg mealworm frass with 5 mg/L zinc lignosulfonate foliar spray produced the greatest agronomic benefits. This combination also markedly increased grain concentrations of zinc, phosphorus, potassium, and nitrogen compared with lower frass rates and the control. Mealworm frass tended to raise the molar ratio of phytic acid to zinc, while foliar zinc reduced this ratio, suggesting that foliar zinc application can partially offset the negative effect of organic amendment on zinc bioavailability. The highest frass rates produced similar phytic acid to zinc ratios, indicating a plateau effect for that response. Overall, applying mealworm frass at 1500 kg/ha combined with foliar application of 5 mg/L zinc lignosulfonate appears to be an effective management strategy to increase wheat yield and enhance grain nutrient content. In addition, foliar zinc helps improvement of zinc availability despite higher phytic acid levels associated with frass. The results of this study showed that these two fertilizers can be used in wheat plant nutrition programs.

Key words: Integrated plant nutrition management, Nitrogen, Phytic acid, Phosphorus, Potassium, Zinc lignosulfonate.

Author Contributions

Conceptualization, A.H. and A.G.; methodology, N.M. and M.B.S.; software, A.H.; formal analysis, N.M. and A.H.; writing-original draft preparation, N.M. and A.H., writing-review and editing A.G and M.B.S.; project administration, A.H.; funding acquisition, A.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Mirzababaei, N., Hassani, A., Golchin, A. & Babaakbari Sari, M. (2025). Effect of mealworm frass application and zinc lignosulfonate foliar spraying on quantity and quality of wheat grain. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(3), 39–56.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68906.1018>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS
JOURNALS



مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد کود بستر کرم میلورم (*Tenebrio molitor*) و محلول پاشی روی لیگنوسولفونات بر کمیت و کیفیت دانه گندم

نیلوفر میرزا ابابایی^۱، اکبر حسنی^۲✉، احمد گلچین^۳، محمد بابا اکبری ساری^۴

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: niloufar.mb@znu.ac.ir

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: akbar.hassani@znu.ac.ir

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: babaakbari@znu.ac.ir

۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin@znu.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

چکیده

افزایش کیفیت دانه‌های غذایی یکی از اهداف کشاورزی پایدار است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر کود بستر کرم میلورم (*Tenebrio molitor*) و محلول پاشی روی لیگنوسولفونات بر رشد و تولید محصول، غلظت عناصر غذایی و نسبت مولی فیتیک اسید به روی دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم مهدوی، به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شرایط مزرعه‌ای اجرا شد. تیمارها شامل چهار سطح کود میلورم (۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار) و سه سطح محلول پاشی روی لیگنوسولفونات (آب آبیاری به عنوان شاهد، محلول پاشی با غلظت‌های ۲/۵ و ۵ در هزار روی لیگنوسولفونات) بود. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین محصول دانه (۵/۱۷ تن بر هکتار) و کاه (۲/۷۵ تن بر هکتار) مربوط به تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود میلورم و ۵ در هزار محلول پاشی روی لیگنوسولفونات بود که نسبت به شاهد به ترتیب ۴۳ و ۹۳ درصد افزایش داشت. تعداد سنبله بارور، ارتفاع گیاه، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله بر اثر اعمال تیمارهای کود میلورم و محلول پاشی افزایش یافت و تأثیر کود میلورم بیشتر از محلول پاشی بود. بیشترین وزن هزار دانه (۴۳/۳۳ گرم) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود میلورم همراه با محلول پاشی ۵ در هزار روی لیگنوسولفونات مشاهده شد. کاربرد کود میلورم سبب افزایش نسبت مولی فیتیک اسید به روی شد (۱۴ درصد) در حالی که محلول پاشی با روی لیگنوسولفونات سبب کاهش آن شد (۷ درصد). غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی دانه با محلول پاشی روی و مصرف کود میلورم افزایش ولی غلظت آهن تغییر معناداری نکرد. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان از کود میلورم و محلول پاشی روی لیگنوسولفونات برای بهبود کمیت و کیفیت دانه گندم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم، روی لیگنوسولفونات، فسفر، فیتیک اسید، مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه، نیتروژن.

استناد به این مقاله: میرزا ابابایی، ن.، حسنی، ا.، گلچین، ا. و بابا اکبری ساری، م. (۱۴۰۴). تأثیر کاربرد کود بستر کرم میلورم (*Tenebrio molitor*) و محلول پاشی روی لیگنوسولفونات بر کمیت و کیفیت دانه گندم. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵ (۳)، ۳۹-۵۶.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68906.1018>

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) غذای اساسی ساکنان خاورمیانه و شمال آفریقا است، جایی که کمبود روی نیز در بدن انسان‌ها شیوع گسترده‌ای دارد (Shewry, 2009). دانه گندم به‌طور ذاتی غلظت روی نسبتاً پایینی دارد و به‌طور میانگین، غلظت آن ۲۰ تا ۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در دانه کامل می‌باشد. با این حال، غلظت روی در آندوسپرم یا آرد تصفیه‌شده کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است زیرا اغلب روی در سبوس گندم ذخیره می‌شود که در کارخانه آردسازی از گندم جدا می‌شود (Cakmak, 2008). دانه گندم غنی از موادی مانند پلی‌فنول‌ها و فیتیک اسید است که با روی اتصال می‌یابند و حل‌پذیری روی در غذا را کاهش می‌دهند و زیست‌فراهمی روی را در بدن انسان محدود می‌کنند (Welch and Graham, 2004).

فیتیک اسید یا هگزوفسفات اینوزیتول، ترکیبی آلی است که در بسیاری از مواد غذایی گیاهی از جمله در دانه ذرت، گندم، برنج، سویا و به مقدار زیاد در غلات و بقولات یافت می‌شود. نسبت مولی فیتیک اسید به عناصر معدنی به عنوان یک معیار کیفی ساده برای زیست‌فراهمی مواد معدنی در رژیم غذایی انسان استفاده می‌شود (Weaver and Kannan, 2001). بنابراین، نسبت فیتیک اسید به روی به‌طور وسیعی به عنوان شاخصی از زیست‌فراهمی روی استفاده شده است. به‌طور کلی، جذب روی توسط دستگاه گوارش انسان زمانی که نسبت فیتیک اسید به روی بیشتر از ۱۵ باشد، به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد (Gargari et al., 2007) و اگر نسبت مولی فیتیک اسید به روی کمتر از ۱۵ باشد، بر زیست‌فراهمی روی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای ندارد (Ryan et al., 2008). غلظت فیتیک اسید در آرد گندم کامل بین ۶ تا ۱۰ گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Febles et al., 2002) در حالی که غلظت فیتیک اسید در آرد تصفیه‌شده کمتر از آرد کامل است و در محدوده ۱/۵ تا ۲ گرم بر کیلوگرم قرار دارد (Li et al., 2015). این در حالی است که نسبت مولی فیتیک اسید به روی در آرد و دانه‌های کامل تقریباً برابر و بیشتر از ۱۵ است (Li et al., 2015). به‌طور کلی، زیست‌فراهمی روی در آرد کامل دانه گندم یا آرد تصفیه‌شده آن نسبتاً پایین در نظر گرفته می‌شود و افزایش غلظت و زیست‌فراهمی روی در دانه‌های گندم یک چالش حیاتی و با اولویت بالا است.

محلول‌پاشی با کودهای روی یکی از راهکارهای افزایش غلظت روی در دانه گندم و کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به روی است. برای کاهش کمبود روی در گیاهان معمولاً از کیلیت‌های مصنوعی روی مانند EDTA-Zn استفاده می‌شود (Alloway, 2008). عوامل کیلیت‌کننده مصنوعی در محیط‌زیست به صورت سخت تجزیه‌پذیر هستند و می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی به تسریع حرکت روی و سایر فلزها در پروفیل خاک کمک کنند (Rodella and Chiou, 2009) و منجر به انباشت این عناصر در آب‌های زیرزمینی شوند (Mikkelsen and Brandon, 1975). کمپلکس‌های ارگانیک طبیعی روی مانند روی لیگنوسولفونات^۱ گروه دیگری از کودهای روی را تشکیل می‌دهند که از کیلیت‌های مصنوعی تجزیه‌پذیرتر و ارزان‌تر هستند زیرا از محصولات جانبی تولید خمیر کاغذ از طریق فرایند سولفیت تولید می‌شوند. پلیمرهای لیگنین به دلیل داشتن گروه‌های عاملی سولفونیک اسید به ترکیبات محلول در آب تبدیل می‌شوند. وجود تعداد قابل‌توجهی از گروه‌های آنیونی شامل گروه‌های سولفونیک، کربوکسیلیک و هیدروکسیل فنلی که می‌توانند پیوندهای کوردینانسی با فلزها تشکیل دهند، لیگنوسولفونات را به یک عامل کمپلکس‌ساز مناسب برای فلزهای عنصرهای غذایی کم‌مصرف تبدیل کنند (Askvik et al., 1999). در سال ۲۰۱۵، بیش از ۲۵ درصد از کودهای روی فروخته شده در بازار اسپانیا از لیگنوسولفونات به عنوان عامل کمپلکس‌کننده استفاده کردند (Sánchez Jiménez and Lucena, 2015). قوانین اتحادیه اروپا کاربرد این ترکیب را در کوددهی، به شکل محلول‌پاشی و اخیراً کاربرد مستقیم در خاک مجاز می‌داند. برخی پژوهشگران کارایی این کمپلکس‌ها را در شرایط کشت هیدروپونیک، کشت در خاک یا

^۱-Zn-lignosulfonate

محلول‌پاشی شاخساره گیاهان مورد بررسی قرار داده‌اند (Álvarez-Fernández *et al.*, 2007; Gonzalez *et al.*, 2011; Benedicto *et al.*, 2008) و در اغلب موارد اثربخشی این کود قابل‌توجه بوده است.

از طرفی دیگر، با توجه به افزایش جمعیت جامعه جهانی و نیاز روزافزون به غذای سالم و کافی، به عنوان پاسخی به چالش‌های موجود در این مورد، پرورش و تولید حشرات به عنوان بخشی از راه حل پیشنهاد شده‌اند. حشرات جایگزینی پایدار و سالم برای محصولات گوشتی معمولی ارائه می‌دهند و با توانایی خود در مصرف زباله‌های غذایی می‌توانند به عنوان یک بازیافت کننده ارگانیک نیز مورد استفاده قرار گیرند (Van Huis, 2013). این کار منجر به رشد سریع صنعت پرورش حشرات در سطح جهان در سال‌های اخیر شده است. یک محصول جانبی فراوان از این صنعت، فضولات حشرات محسوب می‌شود که به آن فراس^۱ گفته می‌شود. میلورم (*Tenebrio molitor*) یا کرم زرد، یکی از بزرگ‌ترین سوسک‌هایی است که در برخی محصولات کشاورزی، به‌ویژه در غلات، آرد و سبوس یافت می‌شود (Rumbos *et al.*, 2020).

به دلیل چرخه و غلظت عناصر غذایی، لارو این حشره که با نام کرم میلورم نیز شناخته می‌شود و یکی از مناسبت‌ترین گونه‌های حشرات برای توسعه صنایع بزرگ پرورش حشرات پیشنهاد شده است (Arévalo *et al.*, 2022). فضولات لارو این حشره، یکی از محصولات فرعی مهم تولید حشرات برای خوراک و غذا است. به‌طور خاص، برای تولید ۱۰۰ گرم زیست‌توده کرم، ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم زیست‌توده فضولات تولید می‌شود (He *et al.*, 2021). یکی از کاربردهای پیشنهادی برای این محصول فرعی، کاربرد در مزارع کشاورزی است (Poveda, 2021). فضولات کرم میلورم می‌توانند همانند کود آلی و مواد محرک رشد گیاهان مورد استفاده قرار گیرند، زیرا قادرند تحمل به تنش‌های غیرزیستی و مقاومت در برابر تنش‌های زیستی را در گیاهان بهبود بخشند. این به دلیل وجود مواد غذایی در خاک و گیاهان، همراه با مولکول‌های زیستی حائز اهمیت (مانند کیتین) و ریزجانداران مفید برای محصولات کشاورزی (محرک‌های رشد گیاه و ناهم‌سازها) است (Poveda, 2021). فضولات معمولاً حاوی مقادیر قابل‌توجهی از قطعات خارجی اسکلت حشره هستند که به نوبه خود، حاوی کیتین هستند (Barragán-Fonseca *et al.*, 2022). همچنین، کیتین در غشای پری‌تروفیک روده حشره وجود دارد که با مدفوع دفع می‌شود (Fescemeyer *et al.*, 2013). کیتین می‌تواند سامانه ایمنی گیاه را تحریک کند، اما فقط زمانی که در اولیگومرهای کوتاه‌تر (۶-۸) حاضر باشد (Li *et al.*, 2020). به احتمال زیاد، کیتینی که در اسکلت خارجی حشره یافت می‌شود، باید قبل از اینکه بتواند اثر تحریک‌کننده ایمنی داشته باشد، توسط ریزجانداران خاک تجزیه شود. گزارش شده است که افزودن پوست نوزاد کرم به خاک می‌تواند رشد باکتری‌های کیتینولیتیک را تحریک کند، که به تجزیه کیتین و بهبود رشد گیاه منجر می‌شود (Bai, 2015). پیشنهاد شده است که فضولات حشرات و پوست آن‌ها می‌توانند به طرق مختلف مانند تحریک ریزجانداران مفید که منجر به ایجاد مقاومت سیستمیک القایی^۲ (ISR) یا پاسخ‌های ایمنی القایی کیتین می‌شوند؛ به مقاومت گیاه کمک کنند (Barragán-Fonseca *et al.*, 2022).

در سال‌های اخیر پرورش و تولید حشرات برای خوراک دام و طیور در ایران افزایش یافته است. در حال حاضر چندین مرکز فروش میلورم در ایران در حال فعالیت هستند. میلورم در بستر سبوس گندم و برنج پرورش داده می‌شود و پس از اتمام دوره رشد، بستر میلورم محتوی بقایای جسم کرم میلورم، مدفوع آن و اندکی سبوس می‌باشد که از آن به عنوان کود میلورم در زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود. خصوصیات شیمیایی کود میلورم نشان می‌دهد که غلظت نیتروژن (۵ درصد)، پتاسیم (۱/۷ درصد)، فسفر (۲ درصد) و کربن آلی (۳۹ درصد) در آن به اندازه غلظت‌های موجود در کود دامی و به‌ویژه کود مرغی است که پتانسیل بالایی تغذیه‌ای آن را تأیید می‌کند (Houben *et al.*, 2020). همچنین، گزارش شده است که مقدار کربن محلول آن زیاد و مقدار کربن شبه‌سلولز و

^۱-Frass

^۲-Induced systemic resistance (ISR)

شبه‌لیگنین در آن کمتر بوده و از این نظر نیز تشابه زیادی با کود مرغی دارد (Li et al., 2013). به‌علاوه، کود میلورم به‌دلیل معدنی شدن سریع آن و وجود مواد غذایی به شکلی که به‌راحتی در دسترس است، به اندازه کود کامل NPK برای بهبود زیست‌توده و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم توسط جو قابل‌استفاده است (Houben et al., 2020). با وجود مطالعات متعدد، تاکنون اثربخشی کاربرد کود روی لیگنوسولفونات بر رشد و عملکرد گندم و همچنین تأثیر آن بر غلظت روی دانه گندم و نسبت مولی فیتیک اسید به روی مورد بررسی قرار نگرفته است و پژوهش در این زمینه ناکافی می‌باشد. همچنین، با توجه به مطالعات اندک در زمینه تأثیر کاربرد کود میلورم و اثربخشی آن بر رشد و عملکرد گیاهان و با در نظر گرفتن شرایط خاکی و اقلیمی کشور ایران و پتانسیل بالای آن در تولید غلات و توجیه اقتصادی آن، توجه به تغذیه گیاه گندم با کودهای آلی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر کاربرد کود میلورم و محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات بر رشد گیاه گندم و کمیت و کیفیت دانه آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ در بخش کهریزک شهرستان ری واقع در استان تهران به اجرا درآمد. برای ارزیابی پاسخ گیاه گندم به سطوح مختلف کود میلورم (*Tenebrio molitor*) و روی لیگنوسولفونات، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار در مزرعه انجام شد. فاکتور اول شامل ۴ سطح کود میلورم (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود میلورم) و فاکتور دوم شامل محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات در سه سطح (محلول‌پاشی آب آبیاری به عنوان شاهد، محلول‌پاشی با غلظت ۲/۵ و ۵ کیلوگرم روی لیگنوسولفونات در هزار لیتر آب) بود. انتخاب این سطوح بر اساس عرف کشاورز و هزینه تمام شده و قیمت کودها بود. کود میلورم از یک مزرعه تولید کرم میلورم با نام مزرعه ورمیکا در اصفهان تهیه شد. کود میلورم تهیه شده شامل ۲/۹۵ درصد نیتروژن، ۲/۴۱ درصد فسفات (P_2O_5)، ۲/۳۹ درصد پتاسیم (K_2O)، ۳۹ درصد کربن آلی، ۳۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن، ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی، ۱۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز و ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس بود. pH عصاره ۱:۱۰ آن ۶/۵۸ و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره ۱:۱۰ آن ۳/۲۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. برای اطمینان، کود تهیه شده دو بار در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفت. روی لیگنوسولفونات نیز از شرکت تولید کننده کود اینترجزپال^۱ اسپانیا تهیه شد. این کود شامل ۱۰ درصد روی، ۵۵ درصد گوگرد آلی و ۲۱ درصد کربن آلی بود. غلظت سایر عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف در این کود ناچیز بود. مقدار pH محلول ۱:۵ این کود ۶/۸ بود. در مجموع، تعداد ۳۶ کرت آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. طول هر کرت ۴ متر و عرض آن ۳ متر بود. به‌طور کلی، ۵۰۰ متر زمین ابتدا کاملاً شخم زده شد و با دیسک تسطیح گردید.

بذر گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم مهدوی به شکل پاششی با دست روی سطح هر کرت با تراکم ۴۵۰ بذر در متر مربع کاشته شد و با شش‌کش زیر خاک برده شد. کشت گیاهان در سوم آبان ماه انجام شد. کود میلورم قبل از کشت بذرها به زمین اضافه شد و با خاک تا عمق ۲۰ سانتیمتری مخلوط شد. محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات بر اساس کد زادوکس در مراحل ۱۷-هفت برگی، ۲۶-ساقه اصلی و شش پنجه، ۵۰-مشاهده اولین سنبله و ۷۳-اوایل شیرگی شدن و در مجموع چهار مرتبه انجام شد. محلول‌پاشی با یک دستگاه سم‌پاش دستی انجام شد. pH محلول روی ۶/۵ تنظیم شد. از مقداری صابون مایع نیز به عنوان سورفکتانت^۲ استفاده شد. برخی ویژگی‌های خاک مزرعه مورد کشت در جدول ۱ ارائه شده است. در طی رشد گیاهان، انجام عملیات داشت مانند مبارزه با علف‌های هرز (به روش دستی)، آبیاری با آب چاه (به روش سطحی و با EC ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و غیره برای کلیه تیمارها به

^۱-Interjospal

^۲-Surfactant

صورت یکسان انجام شد.

برداشت بوته‌ها در مرحله رسیدگی کامل دانه که مصادف با نیمه دوم خرداد ماه بود، انجام شد. در هر کرت آزمایشی، یک متر مربع به عنوان شاخص اندازه‌گیری انتخاب و ۱۸ بوته در هر متر مربع برداشت شد و مهم‌ترین شاخص‌های رشد و عملکرد شامل ارتفاع بوته اصلی، تعداد دانه در هر سنبله، طول سنبله، وزن هزار دانه، محصول دانه و محصول کاه اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری تعداد کل سنبله بارور در هر متر مربع نیز با پلات‌های آزمایشی استاندارد انجام شد. پس از برداشت، دانه‌ها به دقت به صورت جداگانه برداشت و در دمای محیط خشک گردید و تمیز کردن و جداسازی دانه‌ها به صورت دستی انجام شد.

برای اندازه‌گیری غلظت ناسر غذایی دانه پس از تهیه نمونه‌های مناسب و آسیاب کردن آن‌ها ابتدا به روش اکسایش خشک (آهن و روی) و تر (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)، نیتروژن به روش کج‌لال، فسفر به روش رنگ‌سنجی با دستگاه اسپکتروفتومتر، پتاسیم به روش شعله‌سنجی با دستگاه فلیم‌فتومتر و روی و آهن به روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی با دستگاه جذب اتمی شرکت آجیلنت مدل AA200 اندازه‌گیری شدند (Karla, 1997). اندازه‌گیری غلظت فیتیک اسید به روش هاگ و لانتسچ (Haug and Lantzs, 1983) انجام شد. اساس این روش بر مبنای رسوب آهن فیتات و اندازه‌گیری آهن باقی‌مانده در محلول رویی (محلول باقی‌مانده) می‌باشد. برای این کار، ۰/۵ گرم دانه آسیاب شده گندم با ۲۵۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید (pH= 3.0) به مدت سه ساعت عصاره‌گیری شد و با استفاده از آب مقطر به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس یک میلی‌لیتر از این عصاره به لوله‌های سانتریفیوژ منتقل و یک میلی‌لیتر از محلول آهن فریک به آن افزوده شد. لوله‌های مورد آزمایش روی پایه‌ای مناسب روی حمام بن‌ماری ثابت شده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب جوش نگهداری شدند. پس از اتمام این دوره و سرد شدن لوله‌ها و رسیدن به دمای اتاق، محتوای لوله‌ها مخلوط و در دور ۳۰۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. در ادامه یک میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور به لوله دیگری منتقل شده و با افزودن ۱/۵ میلی‌لیتر محلول بی‌پیریدین، جذب در طول موج ۵۱۹ نانومتر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج (اسپکتروفتومتر) خوانده شد. نسبت مولی فیتیک اسید به روی از تقسیم میلی‌مول فیتیک اسید به میلی‌مول روی محاسبه شد.

تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. از نرم‌افزار Excel برای ترسیم نمودارها استفاده شد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و برخی عناصر غذایی موجود در خاک زیر کشت گیاه گندم (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر).

رس	سیلت	شن	بافت خاک	pH	ECe	رطوبت خاک	کربن آلی	کلسیم کربنات معادل	نیتروژن
هیدرومتری	گل اشباع	گل اشباع	عصاره اشباع	اشباع	والکلی- بلک	تیتروژن	کج‌لال	(درصد)	(درصد)
۲۰	۳۱	۴۹	لوم	۷/۴۵	۱/۲۳	۳۵	۰/۳۸	۱۸	۰/۰۴۸

ادامه جدول ۱.

پتاسیم قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	روی قابل استفاده	آهن قابل استفاده	منگنز قابل استفاده	مس قابل استفاده
آمونیم استات	اوسن	DTPA	DTPA	DTPA	DTPA
(میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)					
۱۸۵	۷/۱۲	۰/۸۲	۸/۶۵	۴/۳۲	۱/۰۸

نتایج

براساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل کود میلورم و روی بر عملکرد دانه و کاه، وزن هزار دانه و تعداد سنبله بارور در متر مربع معنادار بود (جدول ۲). همچنین اثر اصلی کود میلورم بر همه صفات اندازه‌گیری شده به جز آهن دانه معنادار بود. اثر اصلی محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات نیز بر عملکرد دانه و کاه، تعداد و طول سنبله، ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، غلظت روی دانه و نسبت مولی اسید فیتیک به روی معنادار بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر کود میلورم و محلول‌پاشی روی بر شاخص‌های رشد، عملکرد و غلظت عناصر دانه گندم.

میانگین مربعات							منبع تغییر	درجه آزادی
نسبت فیتیک اسید به روی	وزن هزار دانه	طول سنبله	تعداد دانه در سنبله	تعداد سنبله	ارتفاع گیاه	عملکرد دانه		
۰/۷۱	۱/۱۴	۰/۰۰۷۵	۱/۰۲	۳۱/۴۴	۳/۲۵	۴۸۲/۴۷	۲	بلوک
۱۴/۶۷**	۱۰۹/۵**	۱۲/۵۶**	۱۳۰/۵**	۱۵۹۲۹**	۴۱۴/۹۹**	۲۷۴۹۰**	۳	کود میلورم
۶/۷۳**	۱۲/۰۲**	۰/۴۹**	۲/۱۹*	۲۰۷۴/۷**	۷/۷۵*	۳۴۶۷/۱**	۲	روی
۰/۲۹ns	۱/۷۶*	۰/۰۳۸ns	۰/۶۰ns	۴۲۳/۳**	۲/۶۰ns	۱۳۳/۱۵**	۶	کود میلورم × روی
۰/۱۵	۰/۶۶	۰/۰۴۶	۰/۵۱	۱۶/۴۱	۱/۹۱	۳۲/۵۸	۲۲	خطای آزمایشی
۱/۸۹	۲/۱۸	۲/۴۸	۲/۱۲	۱/۴۳	۱/۶۳	۱/۳۲	-	ضریب تغییرات (%)

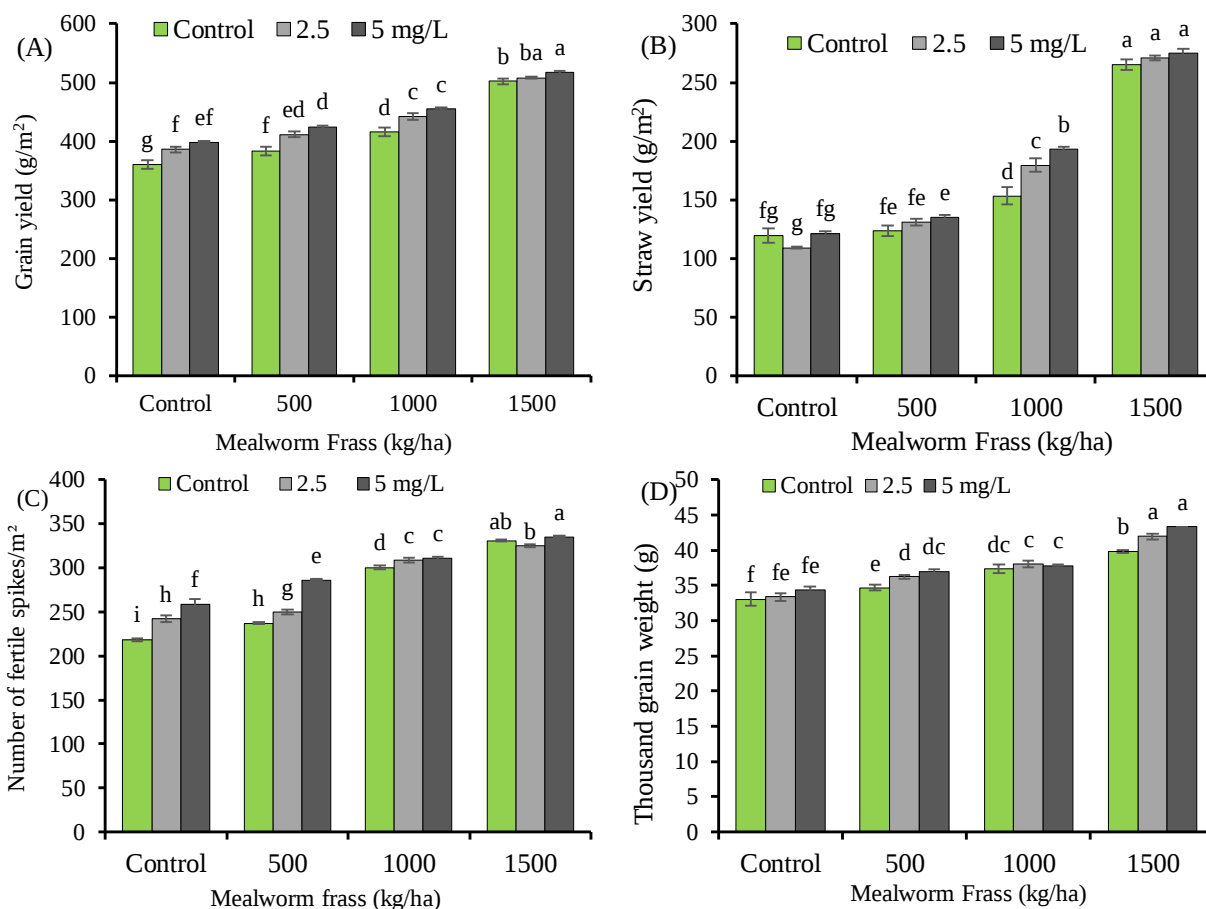
ادامه جدول ۲.

میانگین مربعات						منبع تغییر	درجه آزادی
روی دانه	آهن دانه	پتاسیم دانه	فسفر دانه	نیترژن دانه	عملکرد کاه		
۰/۰۰۱۸	۰/۰۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۱۱	۱۳۸/۰۶	۲	بلوک
۰/۱۲۴*	۰/۰۶ns	۰/۱۵**	۰/۰۳۵**	۱/۵۰**	۴۳۵۹۵/۶۹**	۳	کود میلورم
۰/۲۲۶**	۰/۰۴ns	۰/۰۰۲۳ns	۰/۰۰۰۵۵ns	۰/۰۰۱ns	۷۴۸/۹۸**	۲	روی
۰/۰۶ns	۰/۰۳ns	۰/۰۰۳۴ns	۰/۰۰۰۲۷ns	۰/۰۰۷۶ns	۲۵۹/۲۳**	۶	کود میلورم × روی
۰/۰۲۷		۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۵۹	۴۱/۶۰	۲۲	خطای آزمایشی
۶/۲۲		۵/۶۶	۶/۰۷	۵/۱۱	۳/۷۲	-	ضریب تغییرات (%)

ns، *، ** : به ترتیب عدم معناداری و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد.

محصول دانه و کاه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرهای ساده و متقابل فاکتورها بر محصول دانه گندم و کاه معنادار بود (جدول ۲). اثر متقابل فاکتورها نشان داد که بیشترین محصول دانه (۵۱۷ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و ۵ در هزار محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات بود که با تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و ۲/۵ در هزار محلول‌پاشی روی در یک گروه قرار داشت. کمترین عملکرد دانه (۳۵۹ گرم در متر مربع) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و محلول‌پاشی صفر روی، مشاهده شد (شکل ۱). همچنین، اثر متقابل فاکتورها نشان داد که بیشترین عملکرد کاه (۲۷۵ گرم در متر مربع) مربوط به تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و ۵ در هزار محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات بود که با سایر تیمارهای ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم (صفر و ۲/۵ در هزار محلول‌پاشی روی) در یک گروه قرار داشت. کمترین عملکرد کاه نیز (۱۰۹ گرم در متر مربع) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و محلول‌پاشی ۲/۵ روی، مشاهده شد که با تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم و صفر در هزار محلول‌پاشی روی در یک گروه قرار داشت (شکل ۱).



شکل ۱ - اثر متقابل سطوح مختلف کود میلورم و محلول پاشی روی لیگنوسولفونات (Control، ۲/۵ و ۵ میلی گرم در لیتر) بر (A): محصول دانه، (B): محصول کاه، (C): تعداد سنبله بارور و (D): وزن هزار دانه در سنبله گندم. یک حرف لاتین مشترک در ستون های هر نمودار، بیانگر عدم تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن است.

تعداد پنجه بارور و وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده تأثیر معنادار اثر متقابل کود میلورم و روی بر تعداد سنبله بارور در متر مربع و همچنین وزن هزار دانه گندم بود (جدول ۲). بیشترین تعداد سنبله بارور (۳۳۵ در متر مربع) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم همراه با محلول پاشی ۵ در هزار روی لیگنوسولفونات دیده شد و کمترین تعداد سنبله بارور (۲۱۸ در متر مربع) در تیمار شاهد بدون کاربرد کود میلورم و روی یافت شد که با سایر تیمارها تفاوت معنادار داشت (شکل ۱). بیشترین وزن هزار دانه (۴۳/۳۳ گرم) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم همراه با محلول پاشی ۵ در هزار روی لیگنوسولفونات دیده شد که با تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و محلول پاشی ۲/۵ در هزار روی لیگنوسولفونات (۴۱/۹۷ گرم) تفاوت معنادار نداشت. کمترین وزن هزار دانه (۳۳/۰۶ گرم) در تیمار شاهد بدون کاربرد کود میلورم و روی یافت شد که با سایر تیمارها تفاوت معنادار داشت (شکل ۱).

ارتفاع گیاه، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله

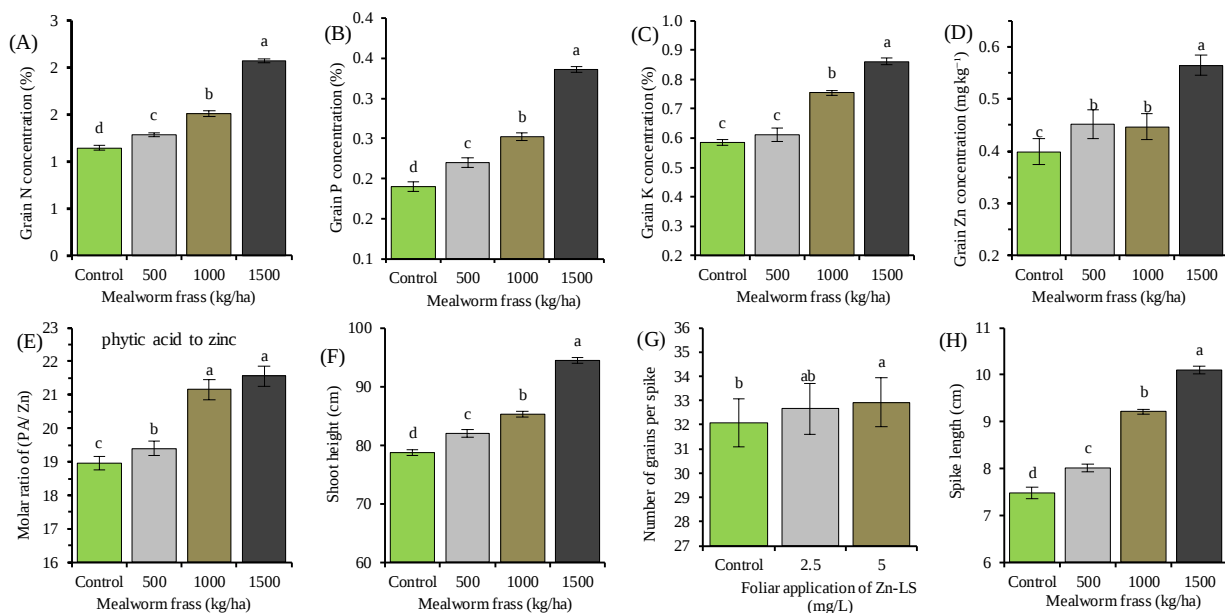
بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرهای ساده روی و کود میلورم بر ارتفاع گیاه معنادار بود (جدول ۲). در بررسی اثر اصلی کود میلورم بیشترین ارتفاع گیاه (۹۴/۴۴ سانتی متر) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و کمترین ارتفاع گیاه نیز (۷۸/۶۶ سانتی متر) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم مشاهده شد (شکل ۲). در بررسی اثر اصلی محلول پاشی روی، بیشترین ارتفاع گیاه در تیمارهای ۵ در هزار به ترتیب با ۸۵/۶۷ و ۸۵/۴۱ سانتی متر دیده شد که با یکدیگر تفاوت

معنادار نداشتند (شکل ۳). کمترین ارتفاع گیاه نیز (۸۴/۱۷ سانتی‌متر) در تیمار صفر محلول‌پاشی دیده شد. تأثیر کود میلورم بر ارتفاع گیاه بیشتر از محلول‌پاشی با روی لیگنوسولفونات بود. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرهای ساده تیمارها بر طول سنبله گندم معنادار بود (جدول ۲). در بررسی اثر اصلی کود میلورم، بیشترین طول سنبله (۱۰/۱ سانتی‌متر) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم اندازه‌گیری شد و کمترین طول سنبله (۷/۴۷ سانتی‌متر) مربوط به تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم بود (شکل ۲). همچنین در بررسی اثر اصلی محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات بر طول سنبله، بیشترین میزان (۸/۸۱ سانتی‌متر) در تیمارهای ۲/۵ و ۵ در هزار محلول‌پاشی روی لیگنوسولفونات و کمترین طول سنبله نیز (۸/۴۶ سانتی‌متر) در تیمار صفر و محلول‌پاشی روی، مشاهده شد (شکل ۳). در این پژوهش تأثیر کود میلورم بر طول سنبله بیشتر از محلول‌پاشی با روی لیگنوسولفونات بود.

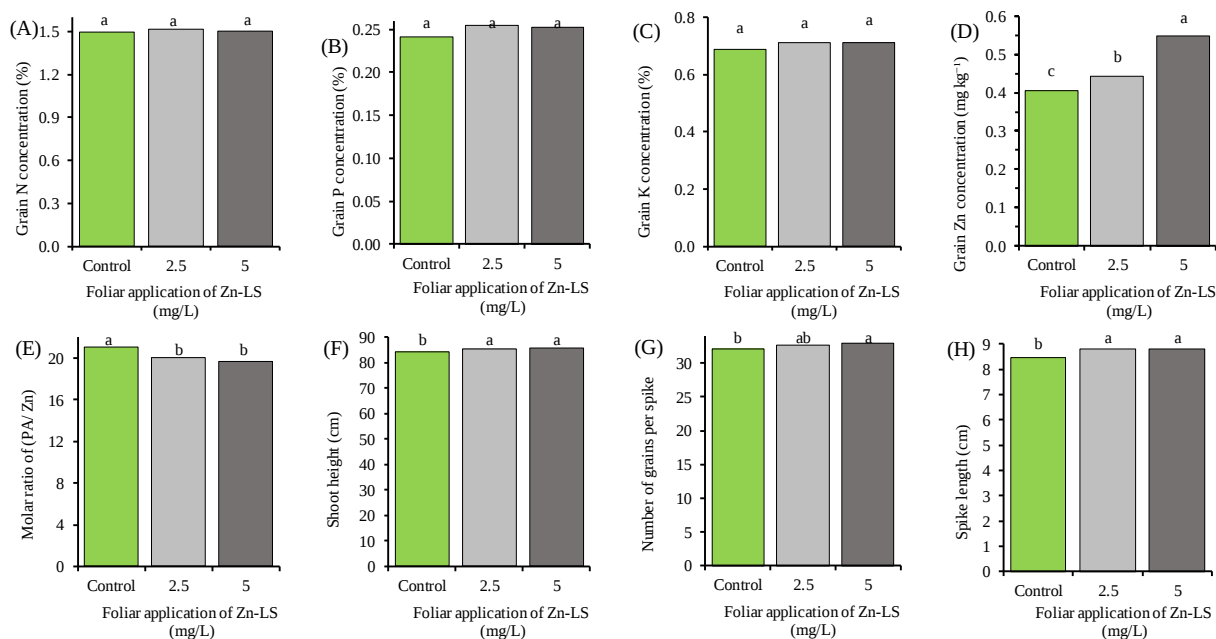
بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرهای ساده روی لیگنوسولفونات و کود میلورم بر تعداد دانه در سنبله معنادار بود (جدول ۲). در بررسی اثر اصلی کود میلورم بیشترین تعداد دانه در سنبله (۳۷/۷۸ دانه) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و کمترین تعداد دانه در سنبله نیز (۲۸/۸۹ دانه) در تیمار صفر کیلوگرم کود میلورم مشاهده شد (شکل ۲). در بررسی اثر اصلی محلول‌پاشی روی، بیشترین تعداد دانه در سنبله در تیمارهای ۲/۵ و ۵ در هزار به ترتیب با ۳۲/۹۲ و ۳۲/۶۷ دانه دیده شد که با یکدیگر تفاوت معنادار نداشتند. کمترین تعداد دانه در سنبله نیز (۳۲/۰۸ دانه) در تیمار صفر محلول‌پاشی دیده شد (شکل ۳).

غلظت عناصر غذایی دانه

بر اساس نتایج به دست آمده، اثر متقابل فاکتورها بر نیتروژن، فسفر و پتاسیم دانه معنادار نبود (جدول ۲). اثر اصلی محلول‌پاشی روی نیز بر این صفات معنادار نبود و فقط اثر اصلی کاربرد کود میلورم بر غلظت این عناصر در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۲). بیشترین غلظت نیتروژن (۲/۰۷ درصد)، فسفر (۰/۳۴ درصد) و پتاسیم (۰/۸۶ درصد) در تیمار ۱۵۰۰ کود کیلوگرم میلورم دیده شد. کمترین غلظت نیتروژن (۱/۱۴ درصد)، فسفر (۰/۱۹ درصد) و پتاسیم (۰/۵۸ درصد) در تیمار صفر کود کیلوگرم میلورم دیده شد (شکل ۲). در پتاسیم دانه بین تیمار صفر و ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم تفاوت معنادار وجود نداشت. کاربرد ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۲۹ درصدی غلظت پتاسیم دانه نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۴۸، ۴۱ و ۱۴ درصدی غلظت پتاسیم دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. در فسفر دانه بین تیمار صفر و ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم تفاوت معنادار وجود داشت. کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۱۵ درصدی غلظت فسفر دانه نسبت به تیمار شاهد شد. کاربرد ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۳۱ و ۱۲ درصدی غلظت فسفر دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد و ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. همچنین کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۷۳، ۵۰ و ۳۲ درصدی غلظت فسفر دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. در نیتروژن دانه بین همه تیمارهای کود میلورم تفاوت معنادار وجود داشت. کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۱۲ درصدی غلظت فسفر دانه نسبت به تیمار شاهد شد. کاربرد ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۳۲ و ۱۸ درصدی غلظت نیتروژن دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد و ۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. همچنین کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۸۱، ۶۲ و ۳۷ درصدی غلظت نیتروژن دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد.



شکل ۲- اثر اصلی کاربرد مقادیر مختلف کود میلورم بر (A): غلظت نیتروژن دانه، (B): غلظت فسفر دانه، (C): غلظت پتاسیم دانه، (D): غلظت روی دانه، (E): نسبت مولی اسید فیتیک به روی، (F): ارتفاع بخش هوایی، (G): تعداد دانه در سنبله و (H): طول سنبله گیاه گندم. حروف متفاوت در ستونهای هر نمودار بیانگر تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد دانکن می باشد.



شکل ۳- اثر اصلی کاربرد سطوح مختلف محلول پاشی روی لیگنوسولفونات بر (A): غلظت نیتروژن دانه، (B): غلظت فسفر دانه، (C): غلظت پتاسیم دانه، (D): غلظت روی دانه، (E): نسبت مولی اسید فیتیک به روی، (F): ارتفاع بخش هوایی، (G): تعداد دانه در سنبله و (H): طول سنبله گیاه گندم. حروف متفاوت در ستونهای هر نمودار بیانگر تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد دانکن می باشد.

غلظت آهن و روی دانه

بر اساس نتایج به دست آمده، اثرهای ساده و متقابل فاکتورها بر غلظت آهن دانه گندم معنادار نبود. بیشترین غلظت آهن (۱۴/۲۵) در تیمار ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم و ۵ در هزار محلول پاشی روی و کمترین غلظت آهن نیز (۱۳/۷۳) در تیمار ۵۰۰ میلورم کود میلورم و محلول پاشی ۲/۵ در هزار روی دیده شد که با یکدیگر تفاوت معنادار نداشتند.

اثر متقابل تیمارها بر غلظت روی دانه گندم معنادار نبود اما اثر اصلی محلولپاشی روی و کود میلورم در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۲). در تیمارهای کود میلورم بیشترین غلظت روی (۰/۵۶ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۱۵۰۰ کود کیلوگرم میلورم دیده شد. کمترین غلظت روی (۰/۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم) نیز در تیمار صفر کود کیلوگرم میلورم دیده شد (شکل ۲). کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۲۷، ۴۳ و ۲۴ درصدی غلظت روی دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. در تیمارهای روی لیگنو سولفونات بیشترین غلظت روی (۰/۵۵ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۵ در هزار روی لیگنو سولفونات دیده شد. کمترین غلظت روی (۰/۴۱ میلی گرم بر کیلوگرم) نیز در تیمار صفر روی لیگنو سولفونات دیده شد (شکل ۳). محلولپاشی ۵ در هزار روی لیگنو سولفونات سبب افزایش ۳۴ و ۲۵ درصدی غلظت روی دانه به ترتیب نسبت به تیمار شاهد و ۲/۵ در هزار روی لیگنو سولفونات شد.

نسبت مولی فیتیک اسید به روی

اثر متقابل تیمارها بر نسبت مولی فیتیک اسید به روی دانه معنادار نبود اما اثر اصلی محلولپاشی روی و کود میلورم در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۲). کاربرد کود میلورم سبب افزایش این نسبت مولی شد درحالی که محلولپاشی با لیگنو سولفونات روی سبب کاهش آن شد (شکل ۲). در تیمارهای کود میلورم بیشترین نسبت در تیمارهای ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ کود کیلوگرم میلورم به ترتیب با نسبت ۲۱/۵۵ و ۲۱/۱۵ دیده شد که با یکدیگر تفاوت معنی دار نداشتند. کمترین نسبت (۱۹/۹۷) نیز در تیمار صفر کود کیلوگرم میلورم دیده شد که با سایر تیمارهای تفاوت معنادار داشت (شکل ۲). کاربرد کاربرد ۱۵۰۰ کیلوگرم کود میلورم سبب افزایش ۱۴، ۱۱ و ۲ درصدی نسبت مولی فیتیک اسید به روی به ترتیب نسبت به تیمار شاهد، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم کود میلورم شد. در تیمارهای روی لیگنو سولفونات بیشترین نسبت (۲۱/۱۱) در تیمار صفر روی لیگنو سولفونات دیده شد (شکل ۳). کمترین نسبت (۱۹/۶۷) نیز در تیمار پنج در هزار روی لیگنو سولفونات دیده شد که با تیمار ۲/۵ در هزار نیز تفاوت معنادار نداشت (شکل ۳). محلولپاشی پنج در هزار روی لیگنو سولفونات سبب کاهش ۷ و ۱/۸ درصدی نسبت مولی فیتیک اسید به روی به ترتیب نسبت به تیمار شاهد و ۲/۵ در هزار روی لیگنو سولفونات شد.

بحث

اثر متقابل دو فاکتور محرک رشد گیاهان می تواند مثبت، منفی یا بدون اثر متقابل باشد. بیشترین عملکرد زمانی به دست می آید که تعادل مناسبی بین عناصر غذایی و سایر عوامل مؤثر بر رشد برقرار باشد. کود میلورم دارای عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان و برخی ترکیبات محرک رشد می باشد و روی لیگنو سولفونات محتوی دو عنصر ضروری روی و گوگرد می باشد. انتظار می رود کاربرد توأم این دو ماده سبب هم افزایی آن ها و افزایش عملکرد گردد که این موضوع در نتایج این پژوهش هم دیده شد. محلولپاشی روی لیگنو سولفونات، تأثیر کود میلورم را در افزایش عملکرد دانه و کاه، تعداد سنبله بارور و وزن هزار دانه غلاف را بهبود بخشیده است. با توجه به غلظت اندک عنصر روی در کود میلورم، به نظر می رسد این هم افزایی منطقی باشد. تأثیر مثبت روی و کود میلورم در افزایش عملکرد گیاهان مختلف از جمله سویا (Mehdiniya Afra and Manavi Amri, 2015)، سیب زمینی (Motalebifard, 2017)، گندم (Feiziasl and Valizadeh, 2004) گزارش شده است. در بررسی های مختلف، کود میلورم با تأمین عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم سبب افزایش رشد شلغم (Poveda et al., 2019)، جو (Houben et al., 2020)، علف راجا (Houben et al., 2020) و کدو سبز (Zim et al., 2022) شده است. در پژوهشی، کاربرد کود میلورم سبب افزایش عملکرد دانه گندم و همچنین افزایش وزن دانه آن شد (Nyanzira et al., 2023). همچنین، گزارش شده است که افزایش رشد گیاه ممکن است به دلیل تحریک فعالیت های میکروبی خاک باشد (Houben et al., 2020). ریزجانداران مفید موجود در کود میلورم

در افزایش تحمل به تنش‌های شوری، خشکی و غرقاب در گیاهان لوبیا مؤثر بوده‌اند (Poveda et al., 2019). در پژوهشی، Blakstad et al. (2023) گزارش کردند که اثربخشی کاربرد کود میلورم در رشد بوته‌های گوجه‌فرنگی به اندازه کود مرغی غنی شده با نیتروژن (۶ درصد)، فسفر (۴/۵ درصد) و پتاسیم (۵ درصد) بود. آنان این افزایش رشد را به وجود ریزجانداران محرک رشد موجود در کود میلورم نسبت دادند.

محلول پاشی با روی لیگنوسولفونات نیز بر رشد و عملکرد گندم در این پژوهش به تنهایی و توأم با کود میلورم مؤثر بود. روی از جمله عناصر ضروری برای رشد گیاه است که در تشکیل هورمون اکسین نقش داشته و رشد گیاه را تنظیم می‌کند. همچنین، روی باعث فعال شدن بسیاری از آنزیم‌ها می‌شود، به طوری که برای سنتز کلروفیل و تشکیل کربوهیدراتها ضروری است. از آنجایی که روی عنصری است که در داخل گیاه قادر به توزیع مجدد نیست، لذا محلول پاشی آن گزینه مناسبی برای غنی سازی دانه غلات و حبوبات می‌باشد (Vitosh et al., 1994) و در این پژوهش نیز با محلول پاشی روی لیگنوسولفونات، غلظت روی در دانه گندم افزایش یافته است و به دنبال آن سایر ویژگی‌های مرتبط با رشد مانند عملکرد دانه و کاه نیز افزایش یافته است. افزایش قابل توجه عملکرد بذری در بالاترین سطح کود میلورم (1500 kg/ha) به‌ویژه همراه با محلول پاشی لیگنوسولفونات روی مشاهده شد. این افزایش احتمالاً ناشی از چند مکانیزم هم‌زمان است: بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (افزایش ماده آلی، نگهداری رطوبت و قابلیت تبادل کاتیون)، افزودن عناصر غذایی و تحریک رشد ریشه و ریزجانداران مفید خاک که جذب عناصر را تسهیل می‌کنند؛ که این سازوکارها با گزارش‌های قبلی درباره اثربخشی کود میلورم در افزایش رشد و ویژگی‌های خاک همخوانی دارد. در تطابق با نتایج این پژوهش در مورد گندم گزارش داده شده است که محلول پاشی با سولفات روی سبب افزایش معنادار تعداد دانه در سنبله، تعداد سنبله بارور و وزن سنبله گندم شد (Abdoli and Esfandiari, 2014).

پرسیوند و همکاران (Parzivand et al., 2011) نیز گزارش نمودند که با محلول پاشی کود روی، عملکرد دانه گندم ۱۳ درصد و عملکرد بیولوژیک پنج درصد افزایش یافت. در یک گزارش (Martin-Ortiz et al., 2009) آزمایش‌های اتاقک رشد نشان دادند که گیاهان ذرت تحت تیمار با روی لیگنوسولفونات بالاترین وزن خشک و غلظت‌های روی در ساقه‌ها را داشتند. همچنین در آزمایش‌های میدانی، غلظت روی در ساقه‌ها به‌طور قابل توجهی در گیاهانی که تحت تیمار با کود روی لیگنوسولفونات + کود NPK بودند، بالاتر از شاهد بود. جلیلیان و همکاران (Jalilian et al., 2014) گزارش نمودند که محلول پاشی روی در گیاه ماش سبز باعث افزایش ۴۷/۱۲ درصدی ارتفاع بوته و افزایش ۱۰/۲۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین گزارش شده است که محلول پاشی با سولفات روی ۰/۵ درصد در گیاه ماش سبز سبب افزایش عملکرد دانه، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف نسبت به تیمار شاهد شد و همچنین این تیمار محلول پاشی با کاربرد مصرف خاکی ۲۵ کیلوگرم سولفات روی تفاوت معنادار نداشت. در این پژوهش تأثیر کاربرد کود میلورم بر عملکرد دانه و کاه گندم بیشتر از محلول پاشی با روی لیگنوسولفونات بود. به نظر می‌رسد کود میلورم به دلیل داشتن انواع مختلف عناصر غذایی و همچنین مواد آلی محرک رشد مؤثرتر عمل کرده است. در پژوهش‌های اخیر بر نقش کود میلورم به عنوان یک محرک رشد و همچنین تقویت کننده گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی تأکید زیادی شده است (Zunzunegui et al., 2024). در مورد اثرات تقویتی، مشخص شده که تأثیر کود میلورم به‌طور چشمگیری بستگی به مقدار مصرف و نوع محصول دارد و در بسیاری از آزمایش‌ها نتایج بسیار مطلوبی به دست آمده است (Verardi, 2025).

افزایش وزن هزار دانه گندم عیار مهمی از اندازه و پر شدن دانه است و معمولاً با عملکرد و کیفیت محصول رابطه مستقیم دارد. تغییرات وزن هزار دانه می‌تواند ناشی از مدیریت تغذیه‌ای، شرایط آبیاری، تنظیم رشد و عوامل فیزیولوژیک بذری باشد (Zhang et al., 2024). کود میلورم حاوی نیتروژن، پتاسیم و همچنین عناصر کم مصرف بوده و با تأمین بهتر عناصر در مرحله پر شدن دانه می‌تواند اندازه و جرم دانه را افزایش دهد. همچنین کود میلورم

با بهبود ساختار خاک و دسترسی به آب و عناصر غذایی ممکن است منجر به پر شدن بهتر دانه‌ها شود. محلول‌پاشی با لیگنوسولفونات روی نیز سبب بهبود غلظت روی در گندم شده و به افزایش وزن هزار دانه کمک کرده است. آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز و مسیر متابولیسم کربوهیدرات مانند آنزیم‌های مرتبط با سنتز نشاسته تحت تأثیر روی عمل می‌کنند؛ در نتیجه کمبود روی می‌تواند تولید یا ذخیره سازی نشا سته در دانه را کاهش دهد (Shoormij *et al.*, 2023). برخی گزارش‌ها نشان می‌دهند لیگنوسولفونات می‌تواند نفوذپذیری و متابولیسم برگ را تغییر دهد و در نتیجه تخصیص قندها به دانه را بهبود دهد (Ilkonen, *et al.*, 2021). از آنجایی که اثر متقابل این دو نیز بر وزن هزار دانه گندم معنی دار شده است، این دو ترکیب ممکن است زمان‌بندی یا مدت مرحله پر شدن دانه را افزایش داده باشند مثلاً مدت پر شدن را طولانی کرده و یا نرخ تجمع مواد خشک در دانه را افزایش داده باشند که به وزن هزار دانه بالاتر منجر شده است.

همچنین، این دو ترکیب غلظت روی، فسفر، پتاسیم و نیتروژن دانه را در مقایسه با مقادیر کمتر کود و تیمار شاهد به‌طور قابل‌توجهی افزایش دادند. این اثر را می‌توان ناشی از افزایش دسترس‌پذیری عناصر در منطقه ریشه و افزایش گرادیان غلظتی به نفع جذب، و نیز نقش ترکیبات موجود در کود میلورم در جلوگیری از تثبیت و شسته‌شدگی عناصر و افزایش کارایی جذب عناصر غذایی دانست که در نتیجه انتقال و ذخیره سازی بیشتر عناصر در دانه را به همراه داشته است (Houben, *et al.*, 2020). همچنین، لیگنوسولفونات ممکن است باعث افزایش نفوذپذیری و توزیع یکنواخت مواد غذایی روی برگ و در صورت جذب برگ، انتقال به دانه را تسهیل کند (Martin-Ortiz, *et al.*, 2009). نسبت مولی فیتیک اسید به عناصر معدنی به عنوان یک معیار کیفی ساده‌شده برای زیست‌فراهمی عناصر غذایی معدنی در رژیم غذایی انسان استفاده می‌شود (Weaver & Kannan, 2001). بنابراین، از نسبت مولی فیتیک اسید به روی به‌طور گسترده‌ای به عنوان شاخصی از زیست‌فراهمی روی استفاده می‌شود. به‌طور کلی، جذب روی در بدن انسان هنگامی که نسبت مولی فیتیک اسید به روی بیشتر از ۱۵ باشد، به شدت کاهش می‌یابد (Gargari *et al.*, 2007) و زیست‌فراهمی روی معمولاً در صورتی که این نسبت کمتر از ۱۵ باشد، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد (Ryan *et al.*, 2008). اگرچه سازمان بهداشت جهانی اعلام نموده است برای آنکه عناصر موجود در ماده غذایی به وسیله دستگاه گوارشی بدن قابل جذب باشد، باید نسبت مولی فیتیک اسید به روی کمتر از ۲۵ باشد (WHO, 1996). نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر کاهش معنادار و چشم‌گیر نسبت مولی فیتیک اسید به روی بر اثر محلول‌پاشی با روی لیگنوسولفونات بود اگرچه کاربرد کود میلورم سبب افزایش این نسبت شد. به‌طور کلی محلول‌پاشی با کودهای محتوی روی و یا کوددهی روی در خاک‌های دارای کمبود روی سبب کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به روی می‌شود (Malakouti, 2011). در تحقیق حاضر نیز محلول‌پاشی روی سبب کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به روی شد. در واقع یک رابطه منفی بین غلظت روی و میزان فیتیک اسید در این تحقیق مشاهده شد. این نتیجه با نتایج تحقیقات (Malakouti, 2011)، (Motesharezadeh & Savaghebi, 2012) و Kaya *et al.* (2009) مطابقت دارد. روی به دلیل داشتن اثر ناهم‌سازی^۱ با فسفر در جذب، انتقال و جابجایی فسفر در داخل گیاه اختلالاتی ایجاد می‌کند که باعث کاهش جذب فسفر و متعاقب آن کاهش میزان فیتیک اسید می‌شود. در این پژوهش کاربرد کود میلورم سبب افزایش غلظت هر دو عنصر فسفر و روی در دانه گندم شده است اما به نظر می‌رسد روند متابولیسم گیاه در پاسخ به کاربرد کود میلورم به گونه‌ای بوده که سبب افزایش نسبت مولی فیتیک اسید به روی شده است. به نظر می‌رسد وجود برخی عوامل زیستی موجود در کود میلورم در غلظت‌های بالا بر مقدار عددی این نسبت مؤثر بوده است. از آنجایی که کود میلورم قبل از کشت به زمین اضافه شده است و گندم نیز در ابتدای رشد اغلب فسفر مورد نیاز خود را جذب می‌کند (Zahedifar *et al.*, 2011) و از طرف دیگر محلول‌پاشی با روی در اواسط دوره رشد گندم انجام شده است به نظر می‌رسد تجمع فسفر در دانه گندم بیشتر از روی بوده است. در نتایج به دست آمده نیز حداکثر افزایش غلظت فسفر دانه گندم در تیمارهای اعمال

^۱-Antagonistic

شده ۷۳ درصد بوده است اما حداکثر افزایش غلظت روی دانه گندم تنها ۳۴ درصد بوده است.

نتیجه گیری

به طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از کود میلورم به میزان ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار همراه با محلول پاشی لیگنوسولفونات روی با غلظت ۵ در هزار، یک راهبرد مدیریتی مؤثر برای افزایش عملکرد گندم و افزایش غلظت عناصر غذایی دانه با شد، در حالی که محلول پاشی روی لیگنوسولفونات به بهبود فراهمی روی با وجود سطوح بالاتر فیتیک اسید مرتبط با کود آلی کمک می کند. تحقیقات بیشتر باید امکان سنجی اقتصادی، اثرهای بلندمدت در خاک و اثرهای آن بر زیست فراهمی روی را در شرایط مزرعه و پس از برداشت در انسان ارزیابی کند. با توجه به قیمت مناسب کود میلورم (حدود هم قیمت با کود مرغی) و روی لیگنوسولفونات (ارزان تر از کیلیت EDTA)، نتایج این تحقیق نشان داد که می توان از این دو کود در برنامه های تغذیه گیاه گندم استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

References

- Abdoli, M. & Esfandiari, E. (2014). Effect of zinc foliar application on the quantitative and qualitative yield and seedlings growth characteristics of bread wheat (cv. Kohdasht). *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), 77-90. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22092/idadj.2014.100557>
- Alloway, B.J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition (2th Ed.). Brussels: International zinc association (IZA), 136p. Brussels, Belgium and Paris, France.
- Álvarez-Fernández, A., Orera, I., Abadía, J., & Abadía, A. (2007). Determination of synthetic ferric chelates used as fertilizers by liquid chromatography-electrospray/mass spectrometry in agricultural matrices. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 18, 37–47.
<https://doi.org/10.1016/j.jasms.2006.08.018>
- Arévalo, H. A. A., Rojas, E. M. M., Fonseca, K. B. B., & Mejía, S. M. V. (2022). Implementation of the HACCP system for production of *Tenebrio molitor* larvae meal. *Food Control*, 138, 109030.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109030>
- Askvik, K. M., Are Gundersen S., Sjöblom J., Merta J., & Stenius P. (1999). Complexation between lignosulfonates and cationic surfactants and its influence on emulsion and foam stability. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 159 89–101. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(99\)00165-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(99)00165-X)
- Bai, Y. (2015). Ecological functioning of bacterial chitinases in soil. Universiteit Leiden (dissertation)
- Barragán-Fonseca, K. Y., Nurfikari, A., Van De Zande, E. M., Wantulla, M., Van Loon, J. J., De Boer, W., & Dicke, M. (2022). Insect frass and exuviae to promote plant growth and health. *Trends in Plant Science*, 27(7), 646-654. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.01.007>
- Benedicto, A., Hernández-Apaolaza, L., Rivas, I., & Lucena, J. J. (2011). Determination of ⁶⁷Zn distribution in navy bean (*Phaseolus vulgaris* L.) after foliar application of ⁶⁷Zn–lignosulfonates using isotope pattern deconvolution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(16), 8829-8838. <https://doi.org/10.1021/jf2002574>
- Blakstad, J. I., Strimbeck, R., Poveda, J., Bones, A. M., & Kissen R. (2023). Frass from yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) as plant fertilizer and defense priming agent. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102862. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102862>
- Cakmak I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>
- Febles C. I., Arias A., Hardisson A., Rodriguez-Alvarez C., & Sierra A. (2002). Phytic acid level in wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 36(1), 19-23. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2001.0441>
- Feiziasl, V., & Valizadeh, Gh. (2004). Effects of phosphorus and zinc fertilizer applications on nutrient concentrations in plant and grain yield in cv. Sardari "*Triticum aestivum*" under dryland conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 6(3), 223- 235. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/20.1001.1.15625540.1383.6.3.5.4>

- Fescemyer, H. W., Sandoya, G. V., Gill, T. A., Ozkan, S., Marden, J. H., & Luthe, D. S. (2013). Maize toxin degrades peritrophic matrix proteins and stimulates compensatory transcriptome responses in fall armyworm midgut. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 43(3), 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2012.12.008>
- Gargari, B. P., Mahboob, S., & Razavieh, S. V. (2007). Content of phytic acid and its mole ratio to zinc in flour and breads consumed in Tabriz, Iran. *Food Chemistry*, 100(3), 1115-1119. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.018>
- Gonzalez, D., Obrador, A., López Valdivia, L. M., & Álvarez, J. M. (2008). Effect of zinc source applied to soils on its availability to navy bean. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 641-649. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0099>
- Haug, W., & Lantzsch, H. J. (1983). Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(12), 1423-1426. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740341217>
- Houben, D., Daoulas, G., Faucon, M. P., & Dulaurent, A. M. (2020). Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties. *Scientific Reports*, 10(1), 4659. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61765-x>
- Ikkonen, E. N., & Jurkevich, M. G. (2021). Effect of lignosulfonate application to sandy soil on plant nutrition and physiological traits. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 862(1), IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012079>
- Jalilian, J., Khade, A., & Pirzad, A. (2014). Effect of Fe and Zn spraying on some characteristics of mungbean using chemical and organic fertilization. *Journal of Crops Improvement*, 16(3), 725-732. <https://doi.org/10.22059/jci.2014.53272>
- Kalra, Y. (Ed.). (1997). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC press.
- Kaya, M., Küçükyumuk, Z. & Erdal, I. 2009. Phytase activity, phytic acid, zinc, phosphorus and protein contents in different chickpea genotypes in relation to nitrogen and zinc fertilization. *African Journal of Biotechnology*, 8, 4508-4513.
- Li, M., Wang, S., Tian, X., Zhao, J., Li, H., Guo, C., Chen, Y. & Zhao, A. (2015). Zn distribution and bioavailability in whole grain and grain fractions of winter wheat as affected by applications of soil N and foliar Zn combined with N or P. *Journal of Cereal Science*, 61, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.09.009>
- Li, K., Xing, R., Liu, S., & Li, P. (2020). Chitin and chitosan fragments responsible for plant elicitor and growth stimulator. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12203-12211. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05316>
- Li, L., Zhao, Z., & Liu, H. (2013). Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica*, 92(1), 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.03.012>
- Malakouti, M., J. (2011). Towards improving the quality of consumed breads in Iran, a review. *Journal of food science and technology*, 8(32), 11-21. (In Persian with English abstract) <https://fsct.modares.ac.ir/article-7-1738-en.html>
- Martin-Ortiz, D., Hernandez-Apaolaza, L., & Garate, A. (2009). Efficiency of a NPK fertilizer with adhered zinc lignosulfonate as a zinc source for maize (*Zea mays* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(19), 9071-9078. <https://doi.org/10.1021/jf9017965>
- Mehdiniya Afra, J., & Manavi Amri, SS. (2015). The effects of interaction between the elements phosphorous and zinc are some traits of soybean cultivars of Sari. *Iranian Journal of Dynamic Agriculture*, 11(4), 309-315. (In Persian with English abstract).
- Mikkelsen, D., & Brandon, D. (1975). Zinc deficiency in California rice. *California Agriculture*, 29(9), 8-9.
- Motalebifard, R. (2017). Effects of Zinc and phosphorus Levels on Yield, Nutrients Uptake and Zinc Recovery and Agronomic Efficiency in Potato. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 886-899. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V31I3.54513>
- Motesharezadeh, B., & Savaghebi, Gh., R. (2012). The effect of balanced fertilization on nutrients' concentration and phytic acid to zinc molar ratio in Iranian red bean (*Phaseolus calcaratus* L.) cultivars at different stages of seed development. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 3(1), 73-84. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/20.1001.1.20089082.1391.3.1.6.4>

- Nyanzira, A., Machona, O., Matongorere, M., Chidzwondo, F., & Mangoyi, R. (2023). Analysis of frass excreted by *Tenebrio molitor* for use as fertilizer. *Entomology and Applied Science Letters*, 10(1-2023), 29-37. <https://doi.org/10.51847/xBw1ooFqXN>
- Parzivand, A., Ghooshchi, F., Momayezi, M.R., & Tohidi Moghaddam, H.R. (2011). Effects of zinc spraying and nitrogen fertilizer on yield and some seed qualitative traits of wheat under drought stress conditions. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Acienes)*, 3(1), 55-69. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/182247/en>
- Poveda, J. (2021). Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Poveda, J., Jiménez-Gómez, A., Saati-Santamaría, Z., Usategui-Martín, R., Rivas, R., & García-Fraile, P. (2019). Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants. *Applied Soil Ecology*, 142, 110-122 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.016>
- Rodella, A. A., & Chiou, D. G. (2009). Copper, zinc, and manganese mobilization in a soil contaminated by a metallurgy waste used as micronutrient source. *Communications in soil science and plant analysis*, 40(9-10), 1634-1644. <https://doi.org/10.1080/00103620902831941>
- Rumbos, C. I., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Psoufakis, P., & Athanassiou, C. G. (2020). Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. *Scientific Reports*, 10(1), 11224. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67363-1>
- Ryan, M. H., McInerney, J. K., Record, I. R., & Angus, J. F. (2008). Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(7), 1208-1216. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3200>
- Sánchez Jiménez, S., & Lucena, J. J. (2015). Characterization of zinc fertilizers. Adjustment to the European and Spanish regulations (in Spanish). *Phytoma*, 272, 47-52.
- Shewry P. R. (2009). Wheat. *Journal of experimental botany*, 60(6), 1537-1553. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
- Shoormij, F., Mirlohi, A., Saeidi, G., Kadivar, M., & Shirvani, M. (2023). Wheat grain quality changes with water stress, zinc, and iron applications predicted by the solvent retention capacity (SRC). *Journal of Cereal Science*, 111, 103665. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103665>
- Van Huis, A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual review of entomology*, 58(1), 563-583. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153704>
- Verardi, A., Sangiorgio, P., Della Mura, B., Moliterni, S., Spagnoletta, A., Dimatteo, S., & Errico, S. (2025). *Tenebrio molitor* Frass: A Cutting-Edge Biofertilizer for Sustainable Agriculture and Advanced Adsorbent Precursor for Environmental Remediation. *Agronomy*, 15(3), 758. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030758>
- Vitosh, M. L., Warncke, D. D., & Lucas, R. E. (1994). Secondary and Micronutrients for Vegetable and Field Crops. Extension Bulletin E-486, Michigan State University Extension Service, 18 p.
- Weaver, C. M., & Kannan, S. (2001). Phytate and mineral bioavailability. pp. 227-240. In: *Food phytates*. CRC Press.
- Welch R. M., & Graham R. D. (2004). Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, 55(396), 353-364. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh064>
- World Health Organization. (1996). Trace elements in human nutrition and health. *WHO Library Cataloguing in Publication Data*, 105-122.
- Zahedifar, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J. and Emam, Y. (2011). Phosphorus and Zinc Distribution in Different Parts and Various Growth Stages of Wheat under Field Conditions. *Water and Soil*, 25(3). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9624>
- Zhang, B., Gu, L., Dai, M., Bao, X., Sun, Q., Qu, X., & Zhen, W. (2024). Estimation of grain filling rate and thousand-grain weight of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using UAV-based multispectral images. *European Journal of Agronomy*, 159, 127258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142608>
- Zim, J., Aitikkou, A., EL Omari, M. H., EL Malahi, S., Azim, K., Hirich, A., & Oumouloud, A. (2022). A new organic amendment based on insect frass for zucchini (*Cucurbita pepo* L.) cultivation. *Environmental Sciences Proceedings*, 16(1), 28, 1-4. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022016028>

Zunzunegui, I., Martín-García, J., Santamaría, Ó. & Poveda, J. (2024). Analysis of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) frass as a resource for a sustainable agriculture in the current context of insect farming industry growth. *Journal of Cleaner Production*, 460, 142608.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142608>