

## Research Article

Vol. 17, No.4, 2026, p. 491-504



## The Effect of Different Sources and Levels of Zinc on the Performance and Retention of Zinc, Copper and Manganese in Laying Hens

Ali Afshar Bakeshlo<sup>1\*</sup>, Behnam Ahmadipour<sup>1</sup>, Fariborz Khajali<sup>1</sup>, Nasrollah Pirany<sup>1</sup>

1- Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

\*Corresponding Author's Email: [afshar@stu.sku.ac.ir](mailto:afshar@stu.sku.ac.ir), [eng.aliafshar@yahoo.com](mailto:eng.aliafshar@yahoo.com)**How to cite this article:**

Received: 04-07-2025

Revised: 10-10-2025

Accepted: 18-11-2025

Available Online: 03-02-2026

Afshar Bakeshlo, A., Ahmadipour, B., Khajali, F., & Pirany, N. (2026). The effect of different sources and levels of zinc on the performance and retention of zinc, copper and manganese in laying hens. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 17(4), 491-504. (in Persian with English abstract).<https://doi.org/10.22067/IJASR.2025.94243.1256>

**Introduction:** Mineral supplements are an important component of the diet of laying hens to improve biochemical processes, embryonic development, and bone structure (Leeson, 2005). Micronutrients are involved in the structure of numerous proteins and hormones as intermediates in metabolism (Tom Dieck et al., 2003). In current commercial practice, micronutrients are added to the diet in inorganic form at levels much higher than those recommended by the National Research Council (NRC) (Leeson, 2005; Bao et al., 2007). Research shows that the addition of micronutrients of organic origin increases the bioavailability of the elements and improves performance due to their insoluble nature and organic complexation (Mézes et al., 2012). Consequently, formulating laying hen diets with trace elements from organic sources due to their higher bioavailability is considered a strategy to reduce the excretion of minerals in the animal's feces. However, these sources are significantly more expensive, making them difficult to access for general use and increasing the cost of the feed. Trace minerals in hydroxychloride form possess several advantages resulting from their unique crystalline structure, such as increased stability and reduced reactivity in feed formulations (Hawthorne & Sokolova, 2002).

**Materials and Methods:** This experiment was conducted with 240 laying hens of the Hy-Line strain (W-36) from 40 to 50 weeks of age for 10 weeks in a completely randomized design with 8 groups in 5 replications and 6 birds per experimental unit. The experimental groups included: Group 1- negative control (without zinc supplementation), groups 2, 3 and 4, respectively, included the negative control diet with 80, 120 and 160 mg/kg zinc sulfate with a purity of 34%, and groups 5, 6 and 7, respectively, included the negative control diet with 50, 75 and 100 mg/kg zinc hydroxychloride with the chemical formula  $\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{Zn}_5(\text{OH})_8$ ) with a purity of 55%, and group 8 included the negative control diet with 124 mg/kg zinc-methionine complex with a purity of 22%. The chickens were allocated to 40 metal cages (6 birds per cage) in a completely random manner within the weight range of  $1590 \pm 25$  g. The composition of the basal diet was adjusted based on the guidelines for the (W-36) strain and the age of 40 to 50 weeks according to Table 1. The temperature range of the house was  $24 \pm 2$  °C and the lighting schedule was set to 16 hours of light and 8 hours of darkness throughout the day according to the recommendations of the breeding guideline. Throughout the experimental period, egg mass production, laying rate, percentage of defective eggs, and survival rate were recorded and calculated for each replicate. Serum concentrations of zinc, copper, and manganese were determined using an atomic absorption spectrophotometer according to the method described by Dozier et al. (2003). To determine the bioavailability (retention) of zinc, copper and manganese, one bird from each replicate was randomly selected and slaughtered at the end of the



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.22067/IJASR.2025.94243.1256>

experiment. Tissue samples, including breast muscle, liver, and tibia, were collected for mineral analysis. The results were analyzed in a completely randomized design. For this purpose, the GLM procedure of SAS software version 9.4 (2015) was employed, and Duncan's test at a significant level of 0.05 was used to compare the means.

**Results and Discussion:** The results presented in Table 2 indicate that zinc accumulation in the pectoral muscle increased linearly with increasing dietary zinc supplementation levels. These changes were influenced by both the bioavailability and the dietary levels of the zinc sources used. Similarly, the storage of zinc in the tibia is strongly affected by the levels and type of its source. Therefore, the zinc storage index in the tibia is a better criterion for measuring its bioavailability. An inverse relationship was observed between dietary zinc concentration and copper accumulation in the pectoral muscle. Specifically, supplementation with 160 mg/kg zinc sulfate and 100 mg/kg zinc hydroxychloride resulted in a significant reduction ( $P < 0.05$ ) in copper deposition in muscle tissue. The results of this study agree with the findings that state the level of zinc in the pectoral and tibia muscles depends on the type of source and its levels in the diet, so with increasing it in the diet, its storage in the tissue increases. This increase in the organic form is due to the specific absorption mechanism of the element chelated with the organic peptide (Afshar Bakeshlo et al., 2024; Hu et al., 2022). The results of Table 3 show that the survival rate in the flock was not affected by the source and level of zinc in the diet ( $P > 0.05$ ). Egg mass was not significantly affected by dietary treatments (Table 3). However, a numerically lower laying rate was observed in the negative control group, which may reflect a compensatory physiological response to zinc deficiency. Also, the increase in egg mass, due to the biological limitations of the bird, is more affected by the amount of energy and protein in the diet than by the zinc element. In confirmation of these findings, it has been reported that different sources and levels of zinc, copper and manganese do not affect the production rate and egg weight in laying hens (Chen et al., 2022; Domel et al., 2024).

**Conclusion:** The use of mineral sources with higher bioavailability and longer tissue retention represents an effective strategy for enhancing the nutritional quality of animal products. Increasing the amount of zinc with conventional inorganic forms, such as zinc sulfate, can reduce copper absorption and lead to negative biological consequences. On the other hand, the use of an organic source, despite retention, is associated with increased production costs and difficulty in supply. Therefore, it is recommended to use a level of 75 mg/kg of zinc hydroxychloride to improve the zinc storage index in eggs, while also enhancing the biological response of the hens.

**Keywords:** Hydroxychloride, Metabolism, Minerals, Poultry, Supplementation

## اثر منابع و سطوح مختلف عنصر روی بر عملکرد و ابقاء عناصر روی، مس و منگنز در مرغ تخم‌گذار

علی افشار بکش‌لو<sup>۱\*</sup>، بهنام احمدی پور<sup>۱</sup>، فربرز خواجعلی<sup>۱</sup>، نصراله پیرانی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

### چکیده

با توجه به اهمیت مکمل عنصر روی در متابولیسم پرندگان و مخاطرات زیست‌محیطی دفع روی در فضولات طیور، توصیه‌هایی مبنی بر استفاده از منابع با زیست‌فراهمی بالاتر صورت می‌پذیرد. این آزمایش به‌وسیله اشکال مختلف مکمل روی شامل سطوح مختلف سولفات، هیدروکسی‌کلرید و کمپلکس آلی روی-متیونین، و تأثیر آن بر شاخص‌های عملکردی و ابقاء عناصر روی، مس و منگنز در مرغ تخم‌گذار، از ۴۰ تا ۵۰ هفته‌گی انجام شد. پرنده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی، به هشت تیمار و پنج تکرار (شش پرنده در هر تکرار) تقسیم گردید. تیمارهای آزمایشی شامل تیمار ۱- شاهد منفی (بدون مکمل روی)، تیمار ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب شامل جیره شاهد منفی به همراه ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات روی با خلوص ۳۴ درصد، و تیمار ۵، ۶ و ۷ به‌ترتیب شامل جیره شاهد منفی به همراه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی‌کلرید روی با فرمول شیمیایی  $Zn_5(OH)_8C_{12}H_{20}$  با خلوص ۵۵ درصد و تیمار ۸ شامل جیره شاهد منفی به همراه ۱۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم کمپلکس روی-متیونین با خلوص ۲۲ درصد بود. یافته‌های این تحقیق نشان داد که افزایش سطح مکمل روی در شکل سولفات سبب کاهش جذب عنصر مس گردید ( $P < 0.05$ )، اما بر جذب منگنز بی‌تأثیر بود ( $P > 0.05$ ). نتایج نشان داد که افزودن حداقل ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم عنصر روی به‌شکل هیدروکسی‌کلرید بدون تأثیر منفی بر جذب مس و منگنز می‌تواند سبب بهبود ابقاء عنصر روی در زرده، کبد، درشت‌نی و افزایش نرخ تخم‌گذاری گردد ( $P < 0.05$ ). همچنین توصیه می‌شود که سطح مکمل روی در جیره با توجه به میزان خلوص منبع و زیست‌فراهمی آن مورد تعدیل و بازنگری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: طیور، متابولیسم، مکمل، مواد معدنی، هیدروکسی‌کلرید

### مقدمه

سیستم اسکلتی قوی به‌طور قابل توجهی بر کیفیت پوسته تخم‌مرغ تأثیر می‌گذارد، تقریباً ۴۰ درصد کلسیم مورد نیاز ساخت پوسته توسط سیستم اسکلتی تأمین می‌شود (Elaroussi et al., 1994). کیفیت پوسته تخم‌مرغ یک نگرانی جدی در صنعت مرغ تخم‌گذار است، به‌طوری که حدود ۱۵ درصد از تخم‌مرغ‌های تولیدشده در مرغداری‌ها به‌دلیل شکستگی از بین می‌روند که منجر به خسارات اقتصادی قابل توجهی می‌شود (Akbari Moghaddam Kakhki et al., 2024). مواد معدنی کم‌نیاز مانند مس، منگنز و روی نقش مهمی در تولید تخم‌مرغ و عملکردهای فیزیولوژیکی طیور دارند. مواد معدنی به‌عنوان اجزاء سازنده متالوآنزیم‌ها در تشکیل غشاء و پوسته تخم‌مرغ نقش ایفا می‌کنند (Mabe et al., 2003). گزارش شده است که افزایش یکی از منابع معدنی کم‌نیاز بر میزان جذب سایر منابع اثر بازدارنده دارد (Domel et al., 2024). منابع معدنی با منشأ آلی می‌توانند به‌جای منابع معدنی با منشأ غیرآلی در جیره جایگزین شوند. مواد معدنی با منشأ آلی توسط لیگاند مربوط به خود از نواحی اسیدی دستگاه گوارش

مکمل عناصر معدنی به‌عنوان جزء مهم جیره مرغ تخم‌گذار برای بهبود فرایندهای بیوشیمیایی، رشد جنینی و همچنین تکمیل ساختار استخوانی به خوراک اضافه می‌شود (Leeson, 2005). عناصر معدنی کم‌نیاز در ساختار صدها پروتئین و هورمون به‌عنوان متابولیسم واسط نقش ایفا می‌کنند (Tom Dieck et al., 2003). امروزه مواد معدنی کم‌نیاز به‌شکل غیرآلی با سطح بسیار بالاتری از میزان توصیه‌شده انجمن تحقیقات بین‌المللی ایالات متحده (NRC) به جیره اضافه می‌گردد (Leeson, 2005). کمبود مواد معدنی به‌خصوص روی، مس و منگنز در کاهش عملکرد کمی و کیفی، رشد جنین و نقص ساختار اسکلتی به‌وضوح قابل مشاهده است (Araújo et al., 2019). یک

۱- گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران  
(\*) نویسنده مسئول: [afshar@stu.sku.ac.ir](mailto:afshar@stu.sku.ac.ir) (Email:)

[eng.aliafshar@yahoo.com](mailto:eng.aliafshar@yahoo.com)

<https://doi.org/10.22067/IJASR.2025.94243.1256>

در کیلوگرم سولفات روی با خلوص ۳۴ درصد، و تیمارهای ۵، ۶ و ۷ به ترتیب شامل، جیره شاهد منفی به همراه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی  $Zn_5(OH_8)C_{12}H_{20}$  با خلوص ۵۵ درصد بود. تیمار ۸ شامل جیره شاهد منفی به همراه ۱۲۴ میلی گرم در کیلوگرم کمپلکس روی - متیونین با خلوص ۲۲ درصد بود. مقادیر خالص عنصر روی در جیره شامل تیمار ۱ جیره شاهد منفی (۳۰ میلی گرم در کیلوگرم)، تیمار ۲، ۵ و ۸ حاوی ۵۷/۲ میلی گرم در کیلوگرم، تیمار ۳ و ۶ حاوی ۷۰/۸ میلی گرم در کیلوگرم و تیمار ۴ و ۷ حاوی ۸۴/۴ میلی گرم در کیلوگرم بود. مرغ‌ها در محدوده وزنی  $1590 \pm 25$  گرم به صورت کاملاً تصادفی به ۴۰ قفس فلزی (شش پرند در هر قفس) منتقل شدند. تکرارها به صورت تصادفی در سه طبقه جانمایی گردید. به منظور سازگاری پرندگان با قفس‌ها و تخلیه ذخایر روی، یک دوره عادت‌پذیری دو هفته پیش از شروع دوره آزمایش اجرا گردید. در این دوره، پرندگان با جیره پایه که مکمل معدنی آن فاقد عنصر روی بود (شاهد) تغذیه شده‌اند. ترکیب جیره پایه براساس راهنمای سویه (W-۳۶) و برای سن ۴۰ تا ۵۰ هفتگی براساس **جدول ۱** تنظیم گردید. محدوده دمای سالن  $24 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد بود و برنامه نوردهی ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت خاموشی در طول شبانه‌روز براساس توصیه راهنمای پرورش تنظیم شد. غلظت عنصر روی در منابع آلی و غیرآلی و هیدروکسی مورد استفاده در این آزمایش به وسیله روش طیف‌سنجی جذب اتمی تعیین گردید (AOAC, 1990).

#### پارامترهای عملکردی

در طی آزمایش، میانگین توده تخم‌مرغ تولیدی، نرخ تخم‌گذاری، درصد تخم‌مرغ معیوب و نرخ زنده‌مانی (درصد بقاء) به شکل هفتگی اندازه‌گیری و میانگین آن در طول دوره گزارش گردید (Farzinpour et al., 2025).

$$\begin{aligned} \text{میانگین وزن تخم مرغ} \times \text{درصد تولید تخم مرغ} &= \text{وزن توده مرغ} \\ \text{میانگین تعداد تخم مرغ طول دوره} \times 100 &= \text{میانگین نرخ تخم‌گذاری (درصد)} \\ \frac{\text{تعداد تخم مرغ شکسته (معیوب)}}{\text{تعداد کل تخم مرغ تولیدی}} \times 100 &= \text{تخم مرغ شکسته - معیوب (درصد)} \\ \frac{\text{میانگین تعداد پرند زنده در پایان هفته}}{\text{میانگین تعداد پرند زنده شروع هفته}} \times 100 &= \text{درصد زنده مانی} \end{aligned}$$

#### سطوح عناصر روی، مس و منگنز در سرم خون

در روز آخر آزمایش، از هر تکرار سه قطعه مرغ به صورت تصادفی انتخاب و از سیاهرگ زیر بال خون‌گیری به عمل آمد. نمونه‌های سرم

طیور به شکل محافظت شده عبور کرده و در روده به نواحی جذب می‌رسند (Bao et al., 2007). تحقیقات نشان می‌دهد که اضافه کردن مواد معدنی کم‌نیاز با منشأ آلی سبب افزایش میزان زیست‌فراهمی عناصر و بهبود عملکرد به دلیل نامحلول بودن و جذب بیشتر می‌گردد (Mézès et al., 2012). در نتیجه، فرموله کردن جیره مرغ تخم‌گذار با عناصر کم‌نیاز با منشأ آلی به دلیل زیست‌فراهمی بالاتر به عنوان یک راهبرد برای کاهش دفع مواد معدنی در مدفوع حیوان مورد توجه قرار دارد. با این حال، این منابع به طور قابل توجهی گران‌تر بوده و دسترسی برای کاربرد عمومی را سخت و قیمت تمام شده خوراک را افزایش می‌دهد.

ساختار هیدروکسی کلرید عناصر معدنی کم‌نیاز به دلیل ساختار ویژه کریستالی دارای مزایای مختلفی می‌باشند (Hawthorne & Sokolova, 2002). پیوندهای کووالانسی قوی بین گروه‌های هیدروکسی و یون‌های کلرید منجر به یک ساختار مولکولی کریستالی می‌شود (Nguyen et al., 2020). این ساختار مولکولی منحصربه‌فرد، آزادسازی تدریجی مواد معدنی را در طی فرآیند گوارش تسهیل می‌کند و منجر به جذب کارآمدتر و در نتیجه کاهش دفع عناصر می‌شود (M'Sadeq et al., 2018). یکی از عوامل کلیدی مؤثر در افزایش اثربخشی منابع هیدروکسی کلرید این است که تنها مقدار حداقلی از این مواد معدنی در آب حل می‌شود، درحالی‌که می‌توانند در شرایط اسیدی به حلالیت کامل برسند (Pang & Applegate, 2006). به علاوه، گزارش شده است که مواد معدنی به شکل هیدروکسی کلراید با ترکیبات غذایی متصل نمی‌شوند و تشکیل کمپلکس‌های غیرقابل هضم را کاهش می‌دهند (Jiang et al., 2021). با توجه به گزارش‌ها و تحقیقات متنوع قبلی در زمینه مواد معدنی کم‌نیاز، هدف این پژوهش بررسی اثر بازدارندگی منابع و سطوح مختلف عنصر روی بر جذب و ابقاء عناصر مس و منگنز در مرغ تخم‌گذار بود.

#### مواد و روش‌ها

این آزمایش با ۲۴۰ قطعه مرغ تخم‌گذارهای لاین سویه (W-۳۶) از ۴۰ تا ۵۰ هفتگی به مدت ۱۰ هفته در یک طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار در پنج تکرار و شش پرند در هر واحد آزمایشی انجام شد. سطوح مکمل روی در هر گروه آزمایشی براساس میزان خلوص منبع و توجه به سطح توصیه راهنمای پرورش (۸۰ میلی گرم در کیلوگرم شکل سولفات) محاسبه گردید. سطح روی در جیره پایه ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم بود. گروه‌های آزمایشی برای مقایسه منابع آلی (کیلات روی - متیونین) و غیرآلی (سولفات، و نمک هیدروکسی) روی شامل تیمار ۱- شاهد منفی (بدون مکمل روی)، تیمارهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب شامل جیره شاهد منفی به همراه ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی گرم

## آنالیز آماری

نتایج به دست آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور از رویه GLM نرم افزار SAS 9.4 نسخه ۲۰۱۵ و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح معنی دار ۰/۰۵ استفاده شد. برای رسم معادله رگرسیونی، ابتدا داده‌ها را در یک نمودار پراکنش (scatter plot) رسم و سپس با استفاده از نرم افزار اکسل، خط رگرسیون را روی نمودار پراکنش ترسیم کرده و معادله آن درج گردید. این خط نشان دهنده بهترین برازش خطی است که داده‌ها را توصیف می‌کند.

## نتایج و بحث

### پارامترهای عملکرد کمی توده تخم مرغ و تولید گله

نتایج گزارش شده در **جدول ۲** نشان می‌دهد که سطوح و منابع عنصر روی تأثیر معنی داری بر توده تخم مرغ نداشت ( $P > 0.05$ ). همچنین **جدول ۲** نشان می‌دهد که شکل آلی عنصر روی در مقایسه با سطح مشابه با اشکال سولفات دارای تفاوت معنی داری در عملکرد می‌باشد ( $P < 0.05$ ). یافته‌ها نشان می‌دهند که کمترین نرخ تخم گذاری مربوط به شاهد منفی است و مکمل کردن روی با منابع و سطوح مختلف سبب افزایش نرخ تخم گذاری شد.

### درصد تخم مرغ‌های شکسته و معیوب

همان طور که در **جدول ۲** گزارش گردید، مکمل کردن خوراک با عنصر روی تأثیر معنی داری بر میزان درصد تخم مرغ‌های شکسته در تیمارها دارد ( $P < 0.05$ ). به طوری که در شاهد منفی، نرخ شکستگی و تخم مرغ معیوب به شکل معنی داری افزایش نشان داد. همچنین تیمار حاوی ۱۶۰ میلی گرم در کیلوگرم مکمل سولفات روی، عملکردی همچون شاهد منفی داشت. کمترین نرخ شکستگی تخم مرغ مربوط به تیمار حاوی ۷۵ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی و همچنین کمپلکس آلی روی بود ( $P < 0.05$ ). معادله رگرسیونی در **شکل ۱** نشان می‌دهد که افزایش سطوح مکمل سولفات روی سبب افزایش تخم مرغ معیوب گردید ( $P < 0.05$ )، در حالی که در مورد سطوح مختلف مکمل هیدروکسی کلرید روی این تفاوت معنی دار نبود ( $P > 0.05$ ).

خون جمع آوری و تا زمان آزمایش‌های سروزوژیکی در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد نگهداری شد. برای اندازه گیری میزان عناصر روی، مس و منگنز در سرم، ابتدا دو میلی لیتر نمونه سرم با چهار میلی لیتر اسیدنیتریک برای ایجاد خاکستر تر مخلوط شده، سپس عملیات تبخیر انجام گردید. سپس غلظت عناصر روی، مس و منگنز محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی اندازه گیری شد (Dozier et al., 2003).

### زیست‌فراهمی (ابقاء عناصر روی، مس و منگنز)

برای اندازه گیری مقدار عناصر روی، مس و منگنز در عضله سینه، کبد و استخوان درشت‌نی، در پایان آزمایش از هر تکرار یک قطعه مرغ به طور تصادفی انتخاب و کشتار گردید. نمونه کبد با وزن مساوی از دو لب کبد و استخوان درشت‌نی پای راست جدا و پس از جدا کردن رطوبت و چربی، در کوره سوزانده و میزان روی، مس و منگنز آن به وسیله دستگاه Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES Analysis) مورد سنجش قرار گرفت. دستگاه ICP از تکنیک طیف‌سنجی نشری استفاده می‌نماید و به این واقعیت تکیه دارد که الکترون‌های برانگیخته در طول موج تابیده شده انرژی از خود ساطع می‌کنند. این برانگیختگی در دستگاه ICP توسط پلاسمای داغ آرگون انجام می‌شود. میزان شدت انرژی تابیده شده در یک طول موج خاص نسبت مستقیم با غلظت حضور آن عنصر در نمونه مورد آنالیز دارد. با تعیین اینکه کدام عنصر در حال نشر در چه طول موجی است و با اندازه گیری شدت آن، مقدار موجود در نمونه اندازه گیری می‌شود. برای آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها در اسید هضم شده و سپس برای اندازه گیری مقدار عناصر از دستگاه ICP-OES Analyzer SPECTRO ARCOS ساخت کشور آلمان استفاده گردید (Kumaravel & Alagusundaram, 2014).

### ذخیره روی، مس و منگنز در زرده و پوسته سخت تخم مرغ

در پایان آزمایش، از هر تکرار سه عدد تخم مرغ به طور تصادفی انتخاب شده و سفیده از زرده جدا گردید. زرده پس از خشک شدن به وسیله تیز آب سلطانی و اسید کلریدریک هضم شده و غلظت عنصر روی، مس و منگنز به وسیله روش ICP-OES Analysis مطابق با دستورالعمل‌های معمول اندازه گیری گردید. با روش فوق، اندازه گیری عناصر روی، مس و منگنز از کل پوسته سخت تخم مرغ‌ها انجام گرفت (Kumaravel & Alagusundaram, 2014).

جدول ۱- اجزاء و ترکیب جیره پایه

Table 1- Ingredient and Composition of base diet

| ماده خوراکی<br>Ingredient                                                 | درصد<br>% |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| دانه ذرت<br>Corn grain                                                    | 54.44     |
| کنجاله سویا (۴۳ درصد)<br>Soybean meal 43%                                 | 22.58     |
| دانه گندم<br>Wheat grain                                                  | 4         |
| کلسیم کربنات<br>Limestone                                                 | 10.16     |
| روغن سویا<br>Soybean oil                                                  | 3.47      |
| سیوس گندم<br>Wheat bran                                                   | 2.7       |
| دی کلسیم فسفات<br>Dicalcium phosphate                                     | 1.54      |
| نمک طعام<br>Common salt (NaCl)                                            | 0.39      |
| مکمل ویتامینی <sup>۱</sup><br>Vitamin premix <sup>1</sup>                 | 0.25      |
| مکمل معدنی <sup>۲</sup><br>Mineral premix <sup>2</sup>                    | 0.25      |
| دی ال - متیونین<br>DL-methionine                                          | 0.14      |
| لازین<br>Lysine                                                           | 0.08      |
| آنالیز شیمیایی<br>Calculated analysis                                     |           |
| انرژی متابولیسمی (کیلوکالری در کیلوگرم)<br>Metabolizable energy (kcal/kg) | 2835      |
| پروتئین خام (درصد)<br>Crude protein (%)                                   | 15.90     |
| کلسیم (درصد)<br>Calcium (%)                                               | 4.35      |
| فسفر در دسترس (درصد)<br>Available phosphorus (%)                          | 0.45      |
| سدیم (درصد)<br>Na (%)                                                     | 0.18      |
| متیونین (درصد)<br>Methionine (%)                                          | 0.38      |
| متیونین - سیستئین (درصد)<br>Met + cys (%)                                 | 0.65      |
| لازین (درصد)<br>Lysine (%)                                                | 0.80      |
| آرژنین (درصد)<br>Arginine (%)                                             | 0.90      |
| ترئونین (درصد)<br>Threonine (%)                                           | 0.58      |
| روی (میلی گرم در کیلوگرم)<br>Zinc (mg/kg)                                 | 30        |

<sup>۱</sup> ترکیب مکمل ویتامینه برای هر کیلوگرم جیره شامل: ۳۲۰۰۰۰۰ واحد بین المللی ویتامین A، ۱۳۲۰۰۰۰ واحد بین المللی ویتامین D<sub>۳</sub>، ۸۰۰ واحد بین المللی ویتامین E، ۹۸۲ میلی گرم B<sub>۱۲</sub>، ۵ میلی گرم ویتامین K، ۲۲۰۰ میلی گرم ریبوفلاوین، ۳۲۰۰ میلی گرم نیاسین، ۴۰۰ میلی گرم کولین کلراید، ۲۵۰ میلی گرم بیوتین، ۳ میلی گرم تیامین، ۴ میلی گرم پیریدوکسین.

<sup>۲</sup> ترکیب مکمل معدنی برای هر کیلوگرم جیره پایه شامل: ۷۵ میلی گرم منگنز، ۷۵ میلی گرم آهن، ۵ میلی گرم مس، ۸۰/۰ میلی گرم ید، ۳۰/۰ میلی گرم سلنیوم.

مکمل روی به اشکال مختلف (آلی و غیر آلی) در مقادیر مورد آزمایش به جیره غذایی گروه شاهد منفی اضافه شد.

مقادیر خالص روی در جیره شامل: تیمار T1 جیره شاهد منفی (۳۰ میلی گرم در کیلوگرم، تیمار T2، T5 و T8 حاوی ۵۷/۲ میلی گرم در کیلوگرم، تیمار T3 و T6 حاوی ۷۰/۸ میلی گرم در کیلوگرم و تیمار T4 و T7 حاوی ۸۴/۴ میلی گرم در کیلوگرم است.

<sup>۱</sup> Vitamin supplement composition for each kilogram of ration includes 3,000,000 international units of vitamin A, 1,300,000 international units of vitamin D<sub>3</sub>, 750 international units of vitamin E, 980 mg of B<sub>12</sub>, 5 mg of vitamin K, 2000 mg riboflavin, 3000 mg niacin, 4 g choline chloride, 250 mg biotin, 3 mg thiamine, and 4 mg pyridoxine.

<sup>۲</sup> Mineral supplement composition for each kilogram of basic ration includes 75 mg of manganese, 75 mg of iron, 5 mg of copper, 0.76 mg of iodine, and 0.1 mg of selenium.

Zinc supplement in different forms (organic and inorganic) was added to the diet of the control group in the amounts tested.

The net zinc levels in the diet were as follows: T1 (30 mg/kg diet), T2, T5, and T8 contained 57.2 mg/kg, T3 and T6 contained 70.8 mg/kg, and T4 and T7 contained 84.4 mg/kg.

## نرخ بقاء در گله

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که نرخ بقاء در گله تحت تأثیر منبع و سطح روی در جیره قرار نگرفت ( $P>0.05$ ). همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، توده تخم‌مرغ تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت و به نظر می‌رسد که پرنده با کاهش نرخ تخم‌گذاری در شاهد منفی، سعی در جبران کمبود عنصر روی داشته است. همچنین افزایش توده تخم‌مرغ با توجه به محدودیت‌های بیولوژیکی پرنده بیش از آنکه تحت تأثیر عنصر روی باشد از میزان انرژی و پروتئین جیره تأثیر می‌پذیرد. در تأیید این یافته‌ها گزارش شده است که منابع و سطوح مختلف عناصر روی، مس و منگنز بر میزان تولید و وزن تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار بی‌تأثیر است (Domel et al., 2022; al., 2024). چنان‌که مشخص است، افزایش میزان تخم‌مرغ‌های معیوب و شکسته در شاهد منفی و تیمار حاوی مقادیر ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم شکل سولفات روی مشهود بود. همچنین در تیمارهای حاوی ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم هیدروکسی کلرید روی و تیمار حاوی منبع آلی مکمل، کاهش شکستگی مشاهده شد. کمبود عنصر روی در شاهد منفی و همچنین افزایش میزان سولفات روی در تیمار حاوی ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از طریق اثر آنتاگونیستی در جذب سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی عناصر معدنی سبب اختلال در روند ساخت پوسته شده‌اند. به نظر می‌رسد که منبع هیدروکسی روی با مسیر جذبی متفاوت از عناصر غیرآلی در دستگاه گوارش، این اثر آنتاگونیستی را ایجاد نکرده است. در نهایت، بهبود کیفیت پوسته با

افزایش مقاومت ناشی از بهبود وضعیت کلسیفیکاسیون بر ماتریس پوسته تخم‌مرغ می‌باشد. به‌طور کلی، عناصر روی و منگنز، استفاده از کلسیم را در مرغ‌های تخم‌گذار افزایش داده و مؤلفه‌های کیفی مقاومت پوسته را بهبود می‌بخشد (Mabe et al., 2003). کمبود عنصر روی از طریق ایجاد ممانعت از فعالیت آنزیم کربونیک آنهیدراز، سبب کاهش یون بی‌کربنات و در نتیجه افزایش میزان تخم‌مرغ‌های بدون پوسته یا با پوسته شکسته و معیوب می‌گردد (Mabe et al., Nys et al., 2001; Moreng et al., 1992). نتایج گزارش شده مؤید یافته‌های مورنگ و همکاران (2003) بود که بیان کردند، اضافه کردن مکمل عنصر روی با منشأ آلی سبب بهبود شاخص‌های کیفی پوسته می‌شود. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، نرخ ماندگاری در گله تحت تأثیر تیمارهای مختلف قرار نگرفت. به نظر می‌رسد که بروز تلفات حاصل از کمبود عنصر روی به مدت زمان بیشتری از محرومیت از این عنصر نیاز دارد. با افزایش سن، توانایی جذب مواد معدنی در دستگاه گوارش کاهش یافته و از سوی دیگر، نیاز به عنصر روی با افزایش اندازه تخم‌مرغ افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود با کاهش ذخیره عنصر روی در بافت استخوانی تیمار ۱ (فاقد مکمل روی)، شاهد تفاوت بین تیمارها باشیم. در راستای این یافته‌ها، هادسون و همکاران (Hudson et al., 2004) بیان داشتند که عنصر روی از طریق بهبود در سیستم ایمنی و کاهش تنش‌های اکسیداتیو سبب افزایش نرخ زنده‌مانی در جوجه‌های گوشتی گردید.

جدول ۲- اثر منابع و سطوح مختلف عنصر روی بر عملکرد کمی مرغ تخم‌گذار

Table 2- The effect of different sources and levels of zinc on the quantitative performance of laying hens

| تیمار <sup>۱</sup><br>Treatment <sup>1</sup> | متغیر<br>Variable                                        |                                               |                                               |                                              |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                              | توده تخم‌مرغ<br>(گرم/مرغ/روز)<br>Egg mass<br>(g/hen/day) | نرخ تخم‌گذاری<br>(درصد)<br>Laying rate<br>(%) | تخم‌مرغ معیوب<br>(درصد)<br>Broken eggs<br>(%) | نرخ زنده‌مانی<br>(درصد)<br>Durability<br>(%) |
| T1                                           | 56.25                                                    | 87.22 <sup>b</sup>                            | 1.56 <sup>c</sup>                             | 91                                           |
| T2                                           | 55.17                                                    | 91.23 <sup>a</sup>                            | 0.84 <sup>bc</sup>                            | 94                                           |
| T3                                           | 56.58                                                    | 92.64 <sup>a</sup>                            | 0.79 <sup>b</sup>                             | 97                                           |
| T4                                           | 56.48                                                    | 90.50 <sup>a</sup>                            | 1.39 <sup>c</sup>                             | 94                                           |
| T5                                           | 56.93                                                    | 91.71 <sup>a</sup>                            | 0.76 <sup>b</sup>                             | 97                                           |
| T6                                           | 58.69                                                    | 92.39 <sup>a</sup>                            | 0.57 <sup>a</sup>                             | 94                                           |
| T7                                           | 57.28                                                    | 92.61 <sup>a</sup>                            | 0.62 <sup>a</sup>                             | 97                                           |
| T8                                           | 56.87                                                    | 91.74 <sup>a</sup>                            | 0.65 <sup>a</sup>                             | 97                                           |
| SEM                                          | 0.726                                                    | 0.24                                          | 0.039                                         | 0.35                                         |
| P-value                                      | 0.0576                                                   | 0.0082                                        | 0.0357                                        | 0.7684                                       |

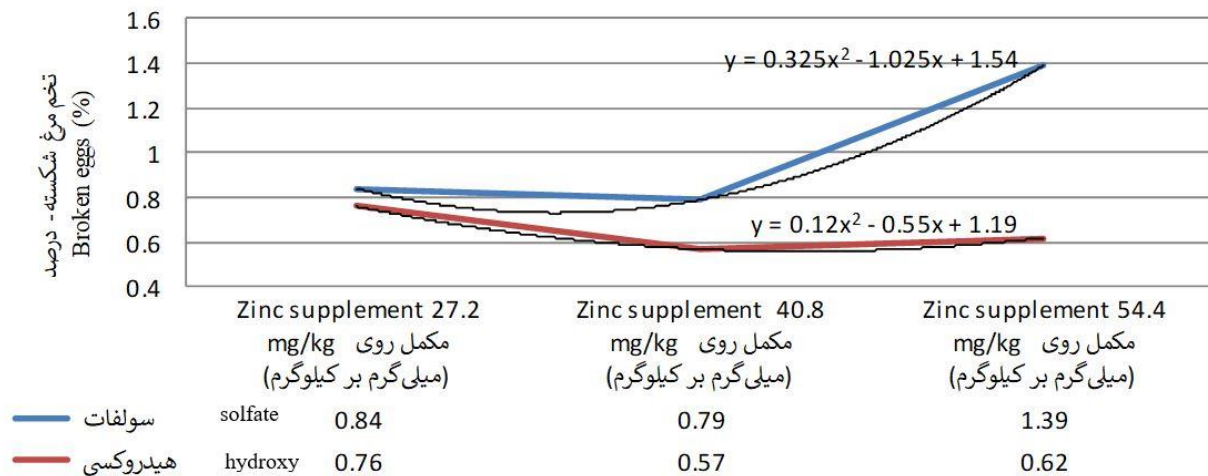
<sup>۱</sup> تیمارهای آزمایشی شامل ۱- شاهد منفی (بدون مکمل روی)، تیمار ۲، ۳ و ۴ به ترتیب شامل جیره شاهد منفی + ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات، تیمار ۵، ۶ و ۷ به ترتیب شامل - جیره شاهد منفی + ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی و تیمار ۸ شامل جیره شاهد + ۱۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم کمپلکس روی - متیونین است. در هر ستون میانگین‌ها با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند ( $P>0.05$ ).

SEM: خطای استاندارد میانگین

<sup>1</sup>The experimental treatments included: T1- negative control (without zinc supplementation), treatments T2, T3 and T4, respectively, included negative control diet + 80, 120 and 160 mg/kg zinc sulfate, and treatments T5, T6 and T7, respectively, included negative control diet + 50, 75 and 100 mg/kg hydroxychloride, and T8, including negative control diet + 124 mg/kg zinc-methionine complex.

a,b,c: Within columns, mean values with common superscript (s) are not different ( $P>0.05$ ).

Standard error of the mean (SEM).



شکل ۱- معادله رگرسیونی تخم مرغ معیوب و شکسته  
Figure 1 - Regression equation for defective and broken eggs

معنی دار ذخیره مس در بافت مشاهده شد. نتایج این پژوهش در توافق یافته‌های است که بیان می‌دارد، سطح روی در عضله سینه و درشتی وابسته به نوع منبع و سطوح آن در جیره است، به‌طوری‌که با افزایش عنصر روی در جیره، ذخیره آن در بافت افزایش می‌یابد. این افزایش در شکل آلی به دلیل سازوکار جذب اختصاصی عنصر کیلات شده با پیتید آلی بیشتر است (Afshar Bakeshlo et al., 2022). با در نظر گرفتن سطح خلوص عنصر مشخص گردید که کمپلکس روی- متیونین سبب افزایش عنصر روی در عضله سینه می‌گردد. در گزارشی بیان شد که دلیل این اختلاف در زیست‌فراهمی به دلیل سازوکار جذب متفاوت بین دو شکل سولفات و منبع آلی می‌باشد (Jahanian et al., 2008). در زمان استفاده از منبع آلی، نیاز به مکمل عنصر روی کاهش می‌یابد و عدم توجه به این موضوع می‌تواند سبب بروز اختلال در جذب مس به دلیل سازوکار آنتاگونیستی این دو عنصر گردد.

#### ذخیره عناصر در کبد

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که سطوح روی و مس به شکل معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای آزمایش قرار داشت ( $P < 0.05$ )، به‌طوری‌که بیشترین مقدار روی مربوط به سطوح مختلف هیدروکسی و شکل آلی روی- متیونین بود. مقدار مس در کبد با سطوح مختلف سولفات روی همبستگی منفی داشت ( $P < 0.05$ ). چنان‌که با افزایش میزان سولفات روی، کاهش مقدار ذخیره مس در کبد مشاهده شد ( $P < 0.05$ ). این تفاوت در سطوح مختلف شکل هیدروکسی معنی‌دار نبود ( $P > 0.05$ ). مقدار منگنز در کبد تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت ( $P > 0.05$ ). کبد به‌عنوان یکی از فعال‌ترین اعضا در بدن مرغ

با توجه به نقش متابولیسمی روی در بدن و مخاطرات زیست محیطی دفع روی در فضولات طیور، توصیه‌های مبنی بر استفاده از منابع با زیست‌فراهمی بالاتر صورت می‌پذیرد. از طرفی دیگر، سبک زندگی مدرن یک عامل تشدیدکننده در کاهش دسترسی به این عنصر است.

#### ابقاء عناصر روی، مس و منگنز در ماهیچه سینه

نتایج مربوط به ابقاء عناصر روی، مس و منگنز در ماهیچه سینه در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که مشخص است، سطوح و منابع مختلف عنصر روی بر ذخیره آن و عنصر مس تأثیر معنی‌داری دارد ( $P < 0.05$ )، ولی سطح عنصر منگنز تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت ( $P > 0.05$ ). بیشترین سطح ذخیره روی مربوط تیمار به ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلراید و تیمار آلی روی- متیونین بود. افزودن سطوح مختلف سولفات روی سبب کاهش سطح ذخیره مس در ماهیچه سینه گردید ( $P < 0.05$ ). نتایج ذخیره روی در عضله سینه نشان داد که با افزایش سطوح مکمل روی به جیره، ذخیره آن به‌طور خطی افزایش یافت. این تغییرات تحت تأثیر زیست‌فراهمی منابع و سطوح مختلف آن است، چنان‌که در درشتی نیز مشخص است، ذخیره عنصر روی به‌شدت متأثر از سطوح و نوع منبع آن قرار دارد. بنابراین شاخص ذخیره روی در درشتی، معیار بهتری برای سنجش زیست‌فراهمی آن در بدن است.

مشخص گردید که با افزایش روی در جیره، سطح ذخیره‌ای مس عضله سینه کاهش یافته و همبستگی منفی از خود نشان می‌دهد، به‌طوری‌که با افزایش سطوح ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم شکل سولفات و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم شکل هیدروکسی، کاهش

در استخوان درشتنی جوجه گوشتی تابعی از نوع منبع و سطح آن در جیره می‌باشد، به‌طوری‌که ذرات به‌شکل نانو سبب ابقاء بیشتر عنصر روی نسبت به شکل سولفات آن در درشتنی می‌گردد (Araújo et al., 2019; Mohammadi et al., 2015; Fatima et al., 2024). یافته‌های شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش سطح روی به‌شکل سولفات، میزان مس ابقاء‌شده در استخوان درشتنی کاهش می‌یابد ( $P < 0.05$ ). در گزارشی بیان شد که عناصر معدنی دو ظرفیتی با اثرات آنتاگونیستی می‌تواند بر جذب سایر مواد معدنی مؤثر باشد (Yang et al., 2021).

#### سطوح عناصر معدنی در زرده تخم‌مرغ

همان‌طور که در یافته‌های مندرج در جدول ۳ قابل مشاهده است، در این آزمایش مقدار ابقاء عنصر تابعی از سطح و نوع منبع آن بود. بیشترین مقدار عنصر در زرده مربوط به تیمار هیدروکسی‌کلرید روی به‌میزان ۱۰۰ میلی‌گرم می‌باشد ( $P < 0.05$ ). چنان‌که در شکل ۳ در مقایسه سطوح مختلف روی با منابع سولفات و هیدروکسی‌کلرید، بیشترین مقدار در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی‌کلرید روی مشاهده گردید و در مقایسه با سطوح مشابه سطح ابقاء عنصر روی در شکل هیدروکسی به‌شکل معنی‌داری بالاتر بود ( $P < 0.05$ ). همچنین افزایش میزان عنصر روی در شکل سولفات سبب کاهش معنی‌دار میزان ابقاء مس در محتویات تخم‌مرغ گردید ( $P < 0.05$ ). در مورد امکان غنی‌سازی تخم‌مرغ به‌وسیله افزودن عنصر روی به جیره نتایج به‌دست‌آمده با گزارشی که به مقایسه اثر اکسید روی و کیلات آلی روی - متیونین بر عملکرد، کیفیت تخم‌مرغ و زیست‌فراهمی در مرغ تخم‌گذار پرداخت، هم‌خوانی داشت. پژوهشگران بیان داشتند که مکمل کردن روی در جیره مرغ تخم‌گذار تأثیر معنی‌داری بر میزان ذخیره روی در تخم‌مرغ دارد (Behjatian et al., 2021; Esfahani et al., 2021; Megha et al., 2021). نتایج به‌دست آمده در پژوهشی که با موضوع تأثیر استفاده از منابع و سطوح مختلف روی بر غنی‌سازی تخم‌مرغ منتشر گردید، بیان داشتند که سطوح مختلف عنصر روی در خوراک بر میزان ذخیره آن در تخم‌مرغ تأثیر معنی‌دار دارد، به‌طوری‌که بیشترین میزان ذخیره مربوط به سطح ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از عنصر روی با شکل آلی می‌باشد (Bahakaim et al., 2014). افزودن یک یا چند ماده مغذی ضروری به مواد غذایی در سطوحی بالاتر از آنچه که به‌طور طبیعی در آن ممکن است وجود داشته یا نداشته باشد را غنی‌سازی (Fortification) گویند، این عمل به منظور پیشگیری یا جبران کمبود ناشی از یک یا چند ماده مغذی در کل جامعه و یا گروه‌های خاصی از جمعیت صورت می‌پذیرد.

تخم‌گذار، نقش مهمی در ذخیره عنصر روی دارد. البته همان‌طور که مشخص است، منبع اصلی ذخیره عنصر روی بافت استخوان است، اما ذخیره روی در کبد می‌تواند به‌عنوان منبع اولیه تأمین نیاز به‌طور محدود مطرح باشد. افزایش سطوح سولفات روی سبب کاهش ذخیره مس در کبد گردید، این موضوع می‌تواند ناشی از اثر آنتاگونیستی بین سولفات روی و مس در جذب توسط روده می‌باشد. این نتایج در توافق با یافته‌های دیگر محققان است که بیان داشتند افزایش میزان روی در جیره جوجه‌های گوشتی سبب هایپرتروفی کبد و احتباس آب ناشی از عدم تعادل الکترولیتی و کاهش یون کلسیم می‌گردد (Khanam, 2020).

#### سطوح عناصر روی، مس و منگنز در سرم خونی و استخوان درشتنی

در مورد عناصر روی، مس و منگنز در سرم خون و خاکستر درشتنی نتایج هم‌سویی مشاهده شد. سطح عنصر روی در خون و ابقاء آن در استخوان درشتنی تحت تأثیر منابع و سطوح مختلف عنصر روی قرار داشت ( $P < 0.05$ ). شاهد منفی (فاقد مکمل روی) کمترین مقدار روی را در درشتنی نشان داد. با افزایش روی با منبع سولفات، افزایش ذخیره آن در درشتنی مشاهده گردید. از سوی دیگر، بیشترین مقدار مربوط به تیمار هیدروکسی‌کلرید روی در سطوح ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و کمپلکس آلی روی - متیونین بود ( $P < 0.05$ ). همچنین افزایش سطوح روی به‌شکل سولفات سبب کاهش میزان جذب مس گردید ( $P < 0.05$ ). در مورد میزان منگنز تفاوت بین تیمارها معنی‌دار نبود ( $P > 0.05$ ). یکی از راهکارهای مشخص نمودن زیست‌فراهمی عناصر معدنی، بررسی ذخایر این عناصر در میزان خاکستر استخوان درشتنی می‌باشد (Smiricky-Tjardes et al., 2024). احتمالاً کیلات روی - متیونین به‌دلیل مسیر متفاوت جذب در بدن دارای زیست‌فراهمی بالاتری نسبت به منابع غیرآلی است. به نظر می‌رسد که ترکیب هیدروکسی‌کلرید روی به‌دلیل پایداری بیشتر در قسمت‌های بالای دستگاه گوارش، از دسترس فیتات در امان مانده و قادر است که در نواحی پایین‌تر دستگاه گوارش جذب گردد. مقادیر ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم هیدروکسی‌کلرید روی سبب کاهش برداشت از ذخایر استخوانی در پیک تولید و ابقاء عنصر در ساختمان استخوانی پرنده گردید ( $P < 0.05$ ). تیمارهای حاوی سطوح مختلف سولفات روی و تیمار حاوی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی‌کلریدی مشابه داشته و کمترین میزان روی مربوط به شاهد منفی بود ( $P < 0.05$ ). در توافق با این یافته‌ها، گزارشی بیان داشت که با افزایش سطح سولفات روی در مکمل جوجه گوشتی، سطح ذخیره آن در استخوان درشتنی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Tayebi Pour et al., 2025; Kumar et al., 2021).

## سطوح روی، مس و منگنز در پوسته سخت

با توجه به داده‌های جدول ۳، میزان ابقاء این عناصر (روی، مس و منگنز) در پوست سخت تخم‌مرغ در تیمارها تحت تأثیر نوع مکمل روی قرار نگرفت. علی‌رغم وجود تفاوت از لحاظ عددی، این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود ( $P>0.05$ ). پوسته سخت تخم‌مرغ به‌عنوان بخشی از ساختار ذخیره عناصر معدنی مطرح است. نشان داده شده که

با افزایش زیست‌فراهمی یک عنصر، میزان ذخیره آن در ساختمان پوسته سخت افزایش یافت (Zhang et al., 2021). نتایج این پژوهش در توافق با یافته‌های سایر محققان است که بیان داشتند منابع با زیست‌فراهمی بالاتر سبب ابقاء روی در پوسته سخت تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار تحت تنش حرارتی گردید (Idowu et al., 2011).

جدول ۳- اثر منابع و سطوح مختلف عنصر روی بر ابقاء عناصر روی، مس و منگنز در مرغ تخم‌گذار

Table 3- The effect of different sources and levels of zinc on the retention of zinc, copper, and manganese in laying hens

| تیمار<br>Treatment | متغیر<br>Variable               |                    |             |                           |                    |             |                   |          |             |
|--------------------|---------------------------------|--------------------|-------------|---------------------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|-------------|
|                    | عضله سینه (میلی گرم در کیلوگرم) |                    |             | کبد (میلی گرم در کیلوگرم) |                    |             | سرم خون           |          |             |
|                    | Breast (mg/kg)                  |                    |             | Liver (mg/kg)             |                    |             | Blood serum       |          |             |
|                    | روی<br>Zn                       | مس<br>Cu           | منگنز<br>Mn | روی<br>Zn                 | مس<br>Cu           | منگنز<br>Mn | روی<br>Zn         | مس<br>Cu | منگنز<br>Mn |
| T1                 | 24.54 <sup>c</sup>              | 1.99 <sup>a</sup>  | 0.11        | 49.68 <sup>c</sup>        | 6.54 <sup>ab</sup> | 2.43        | 1.52 <sup>c</sup> | 30.65    | 3.914       |
| T2                 | 28.58 <sup>b</sup>              | 1.64 <sup>ab</sup> | 0.08        | 57.47 <sup>b</sup>        | 5.93 <sup>ab</sup> | 2.11        | 1.95 <sup>b</sup> | 32.48    | 4.084       |
| T3                 | 31.62 <sup>ab</sup>             | 1.42 <sup>ab</sup> | 0.07        | 61.26 <sup>b</sup>        | 4.61 <sup>b</sup>  | 1.34        | 1.96 <sup>b</sup> | 34.97    | 4.072       |
| T4                 | 30.59 <sup>ab</sup>             | 1.17 <sup>b</sup>  | 0.06        | 55.11 <sup>b</sup>        | 7.28 <sup>ab</sup> | 3.02        | 1.90 <sup>b</sup> | 38.18    | 5.117       |
| T5                 | 29.68 <sup>ab</sup>             | 1.85 <sup>ab</sup> | 0.07        | 74.94 <sup>a</sup>        | 8.26 <sup>a</sup>  | 2.86        | 1.99 <sup>b</sup> | 40.46    | 4.125       |
| T6                 | 34.23 <sup>a</sup>              | 1.73 <sup>ab</sup> | 0.09        | 69.37 <sup>ab</sup>       | 7.76 <sup>ab</sup> | 2.67        | 2.31 <sup>a</sup> | 42.73    | 4.127       |
| T7                 | 35.85 <sup>a</sup>              | 1.69 <sup>ab</sup> | 0.10        | 76.18 <sup>a</sup>        | 9.27 <sup>a</sup>  | 3.35        | 2.34 <sup>a</sup> | 39.28    | 4.128       |
| T8                 | 33.94 <sup>a</sup>              | 1.82 <sup>ab</sup> | 0.09        | 72.54 <sup>a</sup>        | 8.84 <sup>a</sup>  | 3.66        | 2.24 <sup>a</sup> | 38.43    | 5.130       |
| SEM                | 0.487                           | 0.032              | 0.004       | 2.17                      | 0.485              | 0.091       | 0.058             | 0.146    | 0.124       |
| P-value            | 0.03254                         | 0.0057             | 0.0781      | 0.0029                    | 0.0063             | 0.0712      | 0.0442            | 0.0914   | 0.999       |

| تیمار<br>Treatment | متغیر<br>Variable             |                    |             |                            |                    |             |                                     |          |             |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------|----------------------------|--------------------|-------------|-------------------------------------|----------|-------------|
|                    | درشت نی (میلی گرم در کیلوگرم) |                    |             | زرده (میلی گرم در کیلوگرم) |                    |             | پوسته تخم‌مرغ (میلی گرم در کیلوگرم) |          |             |
|                    | Tibia (mg/kg)                 |                    |             | Yolk (mg/kg)               |                    |             | Eggshell (mg/kg)                    |          |             |
|                    | روی<br>Zn                     | مس<br>Cu           | منگنز<br>Mn | روی<br>Zn                  | مس<br>Cu           | منگنز<br>Mn | روی<br>Zn                           | مس<br>Cu | منگنز<br>Mn |
| T1                 | 125 <sup>c</sup>              | 2.82 <sup>ab</sup> | 4.91        | 27.93 <sup>c</sup>         | 3.46 <sup>a</sup>  | 0.797       | 2.56                                | 2.87     | 1.420       |
| T2                 | 136 <sup>bc</sup>             | 2.61 <sup>b</sup>  | 4.75        | 31.53 <sup>c</sup>         | 3.01 <sup>a</sup>  | 0.845       | 3.24                                | 2.42     | 1.638       |
| T3                 | 150 <sup>bc</sup>             | 2.54 <sup>bc</sup> | 4.13        | 30.00 <sup>c</sup>         | 2.84 <sup>ab</sup> | 0.784       | 3.03                                | 2.53     | 1.334       |
| T4                 | 163 <sup>bc</sup>             | 2.39 <sup>c</sup>  | 5.48        | 29.60 <sup>c</sup>         | 2.57 <sup>b</sup>  | 0.813       | 3.14                                | 2.04     | 1.236       |
| T5                 | 186 <sup>b</sup>              | 2.97 <sup>ab</sup> | 5.73        | 30.73 <sup>c</sup>         | 3.25 <sup>a</sup>  | 0.852       | 3.17                                | 2.67     | 1.543       |
| T6                 | 277 <sup>a</sup>              | 2.99 <sup>ab</sup> | 6.92        | 41.47 <sup>b</sup>         | 3.34 <sup>a</sup>  | 0.911       | 3.56                                | 2.49     | 1.841       |
| T7                 | 299 <sup>a</sup>              | 3.02 <sup>a</sup>  | 6.07        | 49.33 <sup>a</sup>         | 3.42 <sup>a</sup>  | 0.849       | 4.36                                | 2.78     | 1.645       |
| T8                 | 275 <sup>a</sup>              | 3.01 <sup>a</sup>  | 5.73        | 41.20 <sup>b</sup>         | 3.17 <sup>a</sup>  | 0.833       | 3.28                                | 2.36     | 1.746       |
| SEM                | 3.52                          | 0.142              | 0.093       | 0.938                      | 0.164              | 0.064       | 0.203                               | 0.112    | 0.017       |
| P-value            | 0.001                         | 0.0491             | 0.990       | 0.0001                     | 0.0258             | 0.9612      | 0.9665                              | 0.7512   | 0.8892      |

تیمارهای آزمایشی شامل ۱- شاهد منفی (بدون مکمل روی)، تیمار ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب شامل جیره شاهد منفی + ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات، تیمار ۵، ۶ و ۷ به‌ترتیب شامل- جیره شاهد منفی + ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی و تیمار ۸ شامل جیره شاهد + ۱۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم کمپلکس روی- متیونین است.

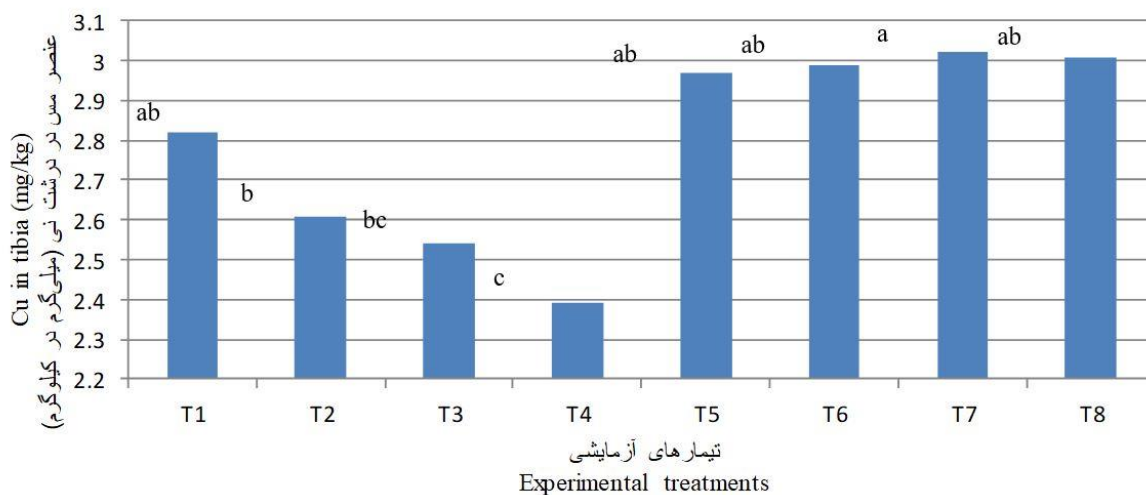
در هر ستون میانگین‌ها با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند ( $P>0.05$ ).

SEM: خطای استاندارد میانگین

The experimental treatments included: T1- negative control (without zinc supplementation), treatments T2, T3 and T4, respectively, included negative control diet + 80, 120 and 160 mg/kg zinc sulfate, and treatments T5, T6 and T7, respectively, included negative control diet + 50, 75 and 100 mg/kg hydroxychloride, and T8, including negative control diet + 124 mg/kg zinc-methionine complex.

a,b,c: Within columns, mean values with common superscript (s) are not different ( $P>0.05$ ).

Standard error of the mean (SEM)

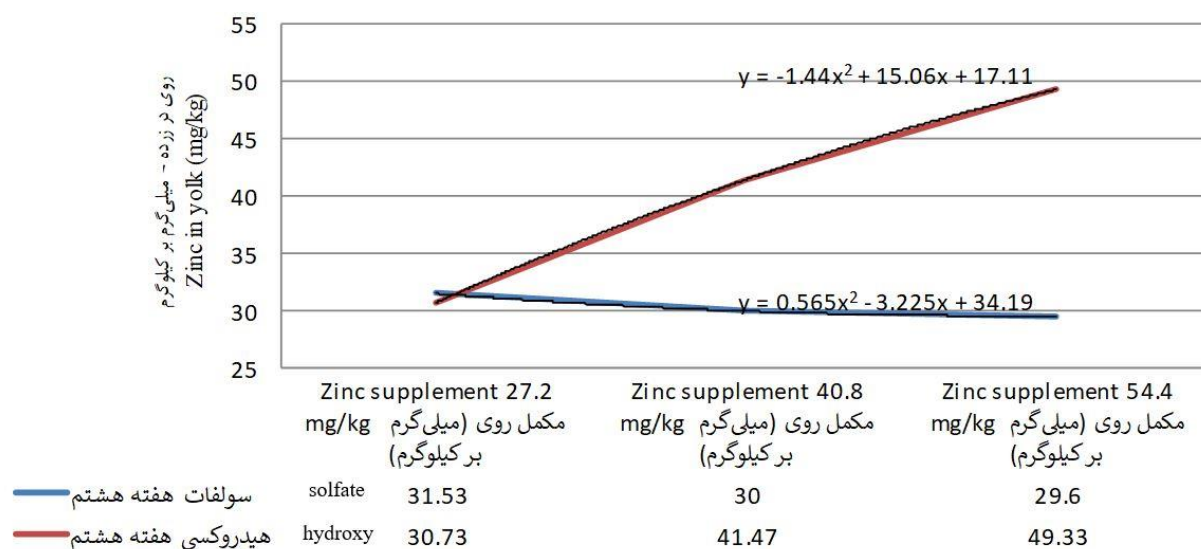


شکل ۲- ابقا عنصر مس در درشت نی مرغ تخمگذار (میلی گرم در کیلوگرم)

Figure 2 - Copper element retention in laying hen tibia (mg/kg)

تیمارهای آزمایشی شامل، ۱- شاهد منفی (بدون مکمل روی)، تیمار ۲، ۳ و ۴ به ترتیب شامل جیره شاهد منفی + ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات روی با خلوص ۳۴ درصد، و تیمار ۵، ۶ و ۷ به ترتیب شامل- جیره شاهد منفی + ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی و تیمار ۸ شامل جیره شاهد + ۱۲۴ میلی گرم در کیلوگرم کمپلکس روی-متیونین

The experimental treatments included: 1- negative control (without zinc supplementation), treatments 2, 3 and 4, respectively, included negative control diet + 80, 120 and 160 mg/kg zinc sulfate, and treatments 5, 6 and 7, respectively, included negative control diet + 50, 75 and 100 mg/kg hydroxychloride, and treatment 8, including negative control diet + 124 mg/kg zinc-methionine complex.



شکل ۳- معادله رگرسیونی ذخیره روی در تخم مرغ در هفته هشتم

Figure 3 - Regression equation of zinc storage in eggs in the eighth week

## نتیجه گیری کلی

قابلیت ابقای بیشتر در بدن پرنده، به عنوان یک راهبرد مؤثر برای غنی سازی تولیدات دامی مطرح است. در این مطالعه، منابع غیرآلی مرسوم (مانند سولفات روی) با ایجاد تداخل در جذب مس، پیامدهای

با توجه به نتایج، استفاده از منابع روی با زیست فراهمی بالا و

شاخص ذخیره‌سازی روی در تخم‌مرغ و ارتقای پاسخ بیولوژیکی پرنده، استفاده از سطح ۷۵ میلی گرم در کیلوگرم هیدروکسی کلرید روی در جیره توصیه می‌شود.

بیولوژیک منفی نشان دادند و منابع آلی نیز با وجود مطلوبیت، با هزینه تولید بالا و دشواری تأمین همراه بودند. در این میان، هیدروکسی کلرید روی به عنوان یک منبع غیرآلی با زیست‌فراهمی بهبودیافته، توانست تعادل بهتری ایجاد کند. بنابراین، به منظور بهبود

## References

1. Afshar Bakeshlo, A., Ahmadipour, B., Khajali, F., & Pirany, N. (2024). Comparative effects of zinc hydroxy chloride, zinc sulfate, and zinc-methionine on egg quality and quantity traits in laying hens. *Animal Science Journal*, 95, e13996. <https://doi.org/10.1111/asj.13996>
2. Akbari Moghaddam Kakhki, R., Alfonso-Carrillo, C., & Garcia-Ruiz, A. I. (2024). Comparative impact of hydroxychloride and organic sources of manganese, zinc, and copper in rearing diets on pullet growth, tibia traits, egg production, and eggshell quality in lohmann brown birds up to 50 weeks of age. *Veterinary Sciences*, 11(6), 245. <https://doi.org/10.3390/vetsci11060245>
3. AOAC, M. (1990). Association of official analytical chemists. Official methods of analysis. *AOAC :Off Methods Anal*, 1, 69-90.
4. Araújo, C. S. D. S., Hermes, R., Bittencourt, L. C., Silva, C., Araújo, L. F., Granghelli, C. A., Pelissari, P. H., Roque, F. d. A., & Leite, B. G. d. S. (2019). Different dietary trace mineral sources for broiler breeders and their progenies. *Poultry Science*, 98(10), 4716-472. <https://doi.org/10.3382/ps/pez182>
5. Bahakaim, A., Abdel Magied, H., Osman, S., Omar, A., Abdelmalak, N., & Ramadan, N. (2014). Effect of using different levels and sources of zinc in layer's diets on egg zinc enrichment. *Egyptian Poultry Science Journal*, 34(1), 39-56. <https://doi.org/10.21608/epsj.2014.5305>
6. Bao, Y., Choct, M., Iji, P., & Bruerton, K. (2007). Effect of organically complexed copper, iron, manganese, and zinc on broiler performance, mineral excretion, and accumulation in tissues. *Journal of Applied Poultry Research*, 16(3), 448-455. <https://doi.org/10.1093/japr/16.3.448>
7. Behjatian Esfahani, M., Moravej, H., Ghaffarzadeh, M., & Nehzati Paghaleh, G. A. (2021). Comparison the Zn-threonine, Zn-methionine, and Zn oxide on performance, egg quality, Zn bioavailability, and Zn content in egg and excreta of laying hens. *Biological Trace Element Research*, 199(1), 292-304. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02141-8>
8. Chen, X., Ma, X. M., Yang, C. W., Jiang, S. Z., Huang, L. B., Li, Y., Zhang, F., Jiao, N., & Yang, W. R. (2022). Low level of dietary organic trace elements improve the eggshell strength, trace element utilization, and intestinal function in late-phase laying hens. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 903615. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.903615>
9. Domel, J. R., House, G. M., Sobotik, E. B., & Archer, G. S. (2024). Evaluation of egg quality and performance in late-lay hens fed different combinations of copper, manganese, and zinc complexed with sulfate or amino acid ion. *Poultry*, 3(1), 36-46. <https://doi.org/10.3390/poultry3010004>
10. Dozier III, W. A., Davis, A. J., Freeman, M. E., & Ward, T. L. (2003). Early growth and environmental implications of dietary zinc and copper concentrations and sources of broiler chicks. *British Poultry Science*, 44(5), 726-731. <https://doi.org/10.1080/00071660310001643714>
11. Elaroussi, M. A., Forte, L. R., Eber, S. L., & Biellier, H. V. (1994). Calcium homeostasis in the laying hen.: 1. Age and dietary calcium effects. *Poultry Science*, 73(10), 1581-1589. <https://doi.org/10.3382/ps.0731581>
12. Farzinpour, A., Mohammadi, Z., & Alibakhshi, R. (2025). Effect of supplementing diet with nanofertile on egg production performance in post-peak laying hens. *Veterinary Research & Biological Products*, 38(2), 41-52. <https://doi.org/10.22092/vj.2025.367657.2193>
13. Fatima, A., Zaheer, T., Pal, K., Abbas, R. Z., Akhtar, T., Ali, S., & Mahmood, M. S. (2024). Zinc oxide nanoparticles significant role in poultry and novel toxicological mechanisms. *Biological Trace Element Research*, 202(1), 268-290. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03651-x>
14. Hawthorne, F. C., & Sokolova, E. (2002). Simonkolleite,  $Zn \sim 5 (OH) \sim 8 Cl \sim 2 (H \sim 2O)$ , a decorated interrupted-sheet structure of the form  $[Mphi \sim 2] \sim 4$ . *Canadian Mineralogist*, 40(3), 939-946. <https://doi.org/10.3749/gscanmin.40.3.939>
15. Hu, Y., Wang, C., Wu, W., Qu, Y., Zhang, W., Li, D., Zhu, L., Gao, F., Wu, B., & Zhang, L. (2022). Organic zinc with moderate chelation strength enhances zinc absorption in the small intestine and expression of related transporters in the duodenum of broilers. *Frontiers in Physiology*, 13, 952941. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.952941>
16. Hudson, B., Dozier III, W., Fairchild, B., Wilson, J., Sander, J., & Ward, T. (2004). Live performance and immune responses of straight-run broilers: Influences of zinc source in broiler breeder hen and progeny diets and ambient

- temperature during the broiler production period. *Journal of Applied Poultry Research*, 13(2), 291-301. <https://doi.org/10.1093/japr/13.2.291>
17. Idowu, O., Ajuwon, R., Oso, A., & Akinloye, O. (2011). Effects of zinc supplementation on laying performance, serum chemistry and Zn residue in tibia bone, liver, excreta and egg shell of laying hens. *International Journal of Poultry Science*, 10(3), 225-230 <https://doi.org/10.3923/ijps.2011.225.230>
18. Jahanian, R., Moghaddam, H. N., & Rezaei, A. (2008). Improved broiler chick performance by dietary supplementation of organic zinc sources. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 21(9), 1348-1354. <https://doi.org/10.5713/ajas.2008.70699>
19. Jiang, Q., Sun, J., He, Y., Ma, Y., Zhang, B., Han, Y., & Wu, Y. (2021). Hydroxychloride trace elements improved eggshell quality partly by modulating uterus histological structure and inflammatory cytokines expression in aged laying hens. *Poultry Science*, 100(11), 101453. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101453>
20. Khanam, S. (2020). Toxicological effect of zinc on liver of broiler chicks. *Egyptian Liver Journal*, 10(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s43066-020-00028-w>
21. Kumar, A., Hosseindoust, A., Kim, M., Kim, K., Choi, Y., Lee, S., Lee, S., Lee, J., Cho, H., Kang, W. S., & Chae, B. (2021). Nano-sized zinc in broiler chickens: Effects on growth performance, zinc concentration in organs, and intestinal morphology. *The Journal of Poultry Science*, 58(1), 21-29. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0190115>
22. Kumaravel, S., & Alagusundaram, K. (2014). Determination of mineral content in Indian spices by ICP-OES. *Oriental Journal of Chemistry*, 30, 631-636. <https://dx.doi.org/10.13005/ojc/300231>
23. LEESON, S. (2005) Trace mineral requirements of poultry-validity of the NRC recommendations, in: TAYLOR-PICKARD, J.A. & TUCKER, L.A. (Eds) Re-defining Mineral Nutrition, pp. 107-117 (Nottingham, Nottingham University Press).
24. M'Sadeq, S. A., Wu, S. B., Choct, M., & Swick, R. A. (2018). Influence of trace mineral sources on broiler performance, lymphoid organ weights, apparent digestibility, and bone mineralization. *Poultry Science*, 97(9), 3176-3182. <https://doi.org/10.3382/ps/pey197>
25. Mabe, I., Rapp, C., Bain, M., & Nys, Y. (2003). Supplementation of a corn-soybean meal diet with manganese, copper, and zinc from organic or inorganic sources improves eggshell quality in aged laying hens. *Poultry Science*, 82(12), 1903-1913. <https://doi.org/10.1093/ps/82.12.1903>
26. Megha, P., Ramnath, V., Raji, K., Babitha, V., & Chacko, B. (2021). Production of zinc enriched designer eggs through dietary supplementation. *Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 52(1), 77-80. <https://doi.org/10.51966/jvas.2021.52.1.77-80>
27. Mézes, M., Erdélyi, M., & Balogh, K. (2012). Deposition of organic trace metal complexes as feed additives in farm animals. *European Chemical Bulletin*, 1(10), 410-413. <https://doi.org/10.17628/ECB.2012.1.410-413>
28. Mohammadi, V., Ghazanfari, S., Mohammadi-Sangcheshmeh, A., & Nazaran, M. H. (2015). Comparative effects of zinc-nano complexes, zinc-sulphate and zinc-methionine on performance in broiler chickens. *British Poultry Science*, 56(4), 486-493. <https://doi.org/10.1080/00071668.2015.1064093>
29. Moreng, R., Balnave, D., & Zhang, D. (1992). Dietary zinc methionine effect on eggshell quality of hens drinking saline water. *Poultry Science*, 71(7), 1163-1167. <https://doi.org/10.3382/ps.0711163>
30. Nguyen, H., Morgan, N., Roberts, J., Swick, R., & Toghyani, M. (2020). Copper hydroxychloride is more efficacious than copper sulfate in improving broiler chicken's growth performance, both at nutritional and growth-promoting levels. *Poultry Science*, 99(12), 6964-6973. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.053>
31. Nys, Y., Gautron, J., McKee, M., Garcia-Ruiz, J., & Hincke, M. (2001). Biochemical and functional characterisation of eggshell matrix proteins in hens. *World's Poultry Science Journal*, 57(4), 401-413. <https://doi.org/10.1079/WPS20010029>
32. Pang, Y., & Applegate, T. J. (2006). Effects of copper source and concentration on in vitro phytate phosphorus hydrolysis by phytase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(5), 1792-1796. <https://doi.org/10.1021/jf052053b>
33. SAS. 2015. SAS User's Guide: Statistics. Version 9.4 Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC.
34. Smiricky-Tjardes, M., Utterback, P., Blair, J., Drysdale, R., Hack, A., Cristobal, M., Glende, J., Parsons, B., & Parsons, C. (2024). Research note: Relative bioavailability of zinc in zinc hydroxychloride for chicks. *Poultry Science*, 103(2), 103315. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103315>
35. Tayebi Pour, A., Majidzadeh Heravi, R., & Kermanshahi, H. (2025). Investigating the effects of different sources and levels of zinc, copper, manganese, and iron on the performance, blood parameters, and tibia characteristics of broiler chickens during the grower and finisher periods. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 17(1), 49-61. <https://doi.org/10.22067/ijasr.2024.88496.1204>
36. Tom Dieck, H., Döring, F., Roth, H. P., & Daniel, H. (2003). Changes in rat hepatic gene expression in response to zinc deficiency as assessed by DNA arrays. *The Journal of Nutrition*, 133(4), 1004-1010. <https://doi.org/10.1093/jn/133.4.1004>
37. Yang, K., Hu, S., Mu, R., Qing, Y., Xie, L., Zhou, L., Ajuwon, K. M., & Fang, R. (2021). Effects of different

- patterns and sources of trace elements on laying performance, tissue mineral deposition, and fecal excretion in laying hens. *Animals*, 11(4), 1164. <https://doi.org/10.3390/ani11041164>
38. Zhang, K. K., Han, M. M., Dong, Y. Y., Miao, Z. Q., Zhang, J. Z., Song, X. Y., Feng, Y., Li, H. F., Zhang, L. H., Wei, Q. Y., Xu, J. P., Gu, D. C., & Li, J. H. (2021). Low levels of organic compound trace elements improve the eggshell quality, antioxidant capacity, immune function, and mineral deposition of aged laying hens. *Animal*, 15(12), 100401. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100401>