Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Research on Animal Production, Vol. 17, Issue 1, 2026 p: 133-149

OPEN ACCESS

Research Paper

Effects of Copper and L-arginine on the Performance, Physiological Maturity, and Egg Quality in the Early Laying Period of Laying Hens

Hasan Rouhanipour[1], Omid Ashayerizadeh[2], Seyed Davood Sharifi [3] and Behrouz Dastar[4]

1- Ph.D. Student, Department of Animal and Poultry Nutrition, Faculty of Animal Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, (Corresponding author: hasanrohanipoor74@ut.ac.ir)
2- Assistant Professor, Department of Animal and Poultry Nutrition, Faculty of Animal Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3- Professor, Department of Animal and Poultry Science, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran
4- Professor, Department of Animal and Poultry Nutrition, Faculty of Animal Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 15 September, 2025 Revised: 25 November, 2025 Accepted: 27 December, 2025

Extended Abstract

Background: Laying hens show their genetic potential when they receive all the nutrients they need in full. Today, nutritional requirements have actually increased due to advances in breeding programs and extensive selection to maximize production. In recent years, L-arginine has been considered a potential feed additive in terms of anabolic-nutritional processes due to its metabolic functions for protein synthesis. However, due to the incomplete uricotelic function and urea cycle of birds, poultry are completely dependent on dietary sources of this amino acid. Copper sulfate is a trace source of the essential element copper, which plays an important role as a cofactor in cytochrome oxidase, lysyl oxidase, superoxide dismutase, beta-hydroxylase, and ceruloplasmin, and can increase egg production and egg weight traits and reduce skeletal system problems. Therefore, this study aimed to investigate the effect of copper and L-arginine on the performance, physiological maturity, and egg quality in the early laying period of laying hens.

Methods: The effects of dietary copper and L-arginine on production performance, physiological maturation, and egg quality were studied during the early layer phase of laying hens (a total of 288 Hy-Line W-80 white laying hens, 18-week-old) in 2 × 3 factorial arrangements with two levels of supplemental Cu (8 and 16 mg/kg in the layer diet denoted as Cu8, Cu16) and three levels of LA. These included the recommended level according to Hy-line (RHL), as well as 20% higher (LA20) and 40% higher (LA40) than the recommended level in the diet. The experiment was designed as a randomized complete block with six treatments of six replicates each, with eight birds per cage, for 4 weeks. The eggs produced were collected daily, and after weighing, the percentage of laying, feed consumption, conversion factor, average egg weight, and egg shape index were calculated weekly. On the last 2 days of each week, the eggs produced by each experimental unit were collected and tested for qualitative traits, such as shell thickness, shell weight, albumen percent, haugh unit, etc. Feed intake of the experimental units was calculated from the fraction of feed consumed at the end of the period from the feed allocated at the beginning of the period, based on chick days. Maturation variables, including body weight and length, shoulder length and width, beak length (top and bottom), neck length, wing length, leg length and diameter, toe length, and talon length were measured at the end of 21 weeks. Data were analyzed in a randomized complete block design with a 3 × 2 factorial arrangement using SAS software.

Results: The height of birds' comb increased when fed diets containing Cu8+LA40 and Cu16+LA40, compared to those fed on the Cu8+RHL diet ($P < 0.05$). The shank diameter increased in birds fed with Cu8+LA40 treatment, compared to those fed on the Cu16+LA20 diet ($P < 0.05$). Egg production of the birds increased in response to the Cu16+LA40 diet, compared to those fed with the Cu8+RHL diet ($P < 0.05$). Dietary supplementation of Cu16+LA40

Copyright ©2026 Rouhanipour et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License which allows users to read, copy, distribute and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

decreased the feed conversion ratio (FCR) compared to those fed Cu8+LA40 and Cu8+RHL treatments ($P < 0.05$). The egg shape index increased in the birds fed Cu8+LA40, compared to the Cu8+RHL diet ($P < 0.05$). Egg shell strength increased in the birds fed diets containing Cu16+RHL and Cu16+LA40 compared to diets containing Cu8+LA20 ($P < 0.05$).
Conclusion: According to the results of this experiment, adding 16 mg of copper/kg with 20% and 40% higher than the recommended level in the production phase diets of laying hens not only improved sexual maturation physiologically but also increased the production performance and egg quality in laying hens during the early layer phase.

Keywords: Copper, L-arginine, Laying hen, Production performance, Sexual maturation

How to Cite This Article: Rouhanipour, H., Ashayerizadeh, O., Sharifi, S.D., & Dastar, B. (2026). Effects of Copper and L-arginine on the Performance, Physiological Maturity, and Egg Quality in the Early Laying Period of Laying Hens. *Res Anim Prod,* 17(1), 133-149. DOI: 10.61882/rap.2026.1524

مقاله پژوهشی

تأثیر مس و ال-آرژنین بر عملکرد، بلوغ فیزیولوژیکی و کیفیت تخم‌مرغ در آغاز دوره تولید مرغ‌های تخم‌گذار

حسن روحانی‌پور[۱]، امید عشایری‌زاده[۲]، سید داود شریفی[۳] و بهروز دستار[۴]

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، گروه تغذیه دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، (نویسنده مسوول: hasanrohanipoor74@ut.ac.ir)
۲- دانشیار، گروه تغذیه دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- استاد، گروه علوم دام و طیور، پردیس فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
۴- استاد، گروه تغذیه دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۹

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: مرغ‌های تخم‌گذار توان ژنتیکی خود را زمانی نشان می‌دهند که تمام مواد مغذی مورد احتیاج را به طور کامل دریافت نمایند. امروزه نیازهای تغذیه‌ای در واقع به‌دلیل پیشرفت در برنامه‌های پرورش و انتخاب گسترده برای به حداکثر رساندن تولید افزایش یافته است. برآوردن این نیازهای غذایی مستلزم دریافت منابع غذایی با کیفیت بالا و بهینه‌سازی مواد مغذی کم‌مصرف جیره در مقادیر مناسب است. در سال‌های اخیر، ال-آرژنین از نظر فرآیندهای آنابولیکی تغذیه‌ای به‌عنوان یک افزودنی خوراکی بالقوه به‌دلیل عملکردهای متابولیکی آن برای ساخت پروتئین مورد توجه قرار گرفته است و به‌دلیل عملکرد اوریکوتلیسمی و چرخه اوره ناقص پرندگان، طیور کاملاً به منابع غذایی این اسید آمینه وابسته هستند. سولفات مس یک منبع کمیاب عنصر ضروری مس به‌دلیل فعالیت بیولوژیکی برای حفظ عملکرد و سلامت بدن است، زیرا نقش مهمی را به‌عنوان کوفاکتور در سیتوکروم اکسیداز، لیزیل اکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، بتا هیدروکسیلاز و سرولوپلاسمین ایفا می‌کند و صفات مربوط به تولید تخم‌مرغ و وزن تخم‌مرغ را افزایش خواهد داد و مشکلات مربوط به سیستم اسکلتی را کاهش می‌دهد. بنابر این، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر مس و ال-آرژنین بر عملکرد، بلوغ فیزیولوژیکی و کیفیت تخم‌مرغ در آغاز دوره تولید مرغ‌های تخم‌گذار بود.

مواد و روش‌ها: جهت بررسی اثر افزودن سطوح مختلف مس و ال-آرژنین بر عملکرد تولیدی، بلوغ فیزیولوژیکی و صفات کیفی تخم‌مرغ در اوایل دوره تولید، مرغ‌های تخم‌گذار با استفاده از تعداد ۲۸۸ قطعه مرغ تخم‌گذار سویه‌های‌لاین W-80 (سن ۱۸ هفتگی) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل ۳×۲ شامل دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) و سه سطح اسیدآمینه ال-آرژنین (شامل سطح توصیه شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه شده)، شش تکرار حاوی هشت قطعه پرنده به مدت ۴ هفته درون قفس پرورش داده شدند. تخم‌مرغ‌های تولید شده روزانه جمع‌آوری و پس از توزین، درصد تخمگذاری، مصرف خوراک، ضریب تبدیل، میانگین وزن تخم‌مرغ و شاخص شکل تخم‌مرغ به‌طور هفتگی محاسبه شدند. در دو روز انتهای هر هفته، تخم‌مرغ‌های تولیدی هر واحد آزمایشی جمع‌آوری شدند و از نظر صفات کیفی نظیر ضخامت پوسته، وزن پوسته، درصد سفیده، واحدها و غیره مورد آزمایش قرار گرفتند. مصرف خوراک واحدهای آزمایشی از کسر خوراک مصرف‌شده در انتهای دوره از خوراک اختصاص داده‌شده در شروع دوره بر مبنای روز جوجه محاسبه شد. در پایان ۲۱ هفتگی، متغیرهای بلوغ شامل وزن و طول بدن، طول و عرض شانه، طول منقار (بالا و پایین)، طول گردن، طول بال، طول و قطر ساق پا، طول انگشتان پا و طول سیخک اندازه‌گیری شدند. داده‌ها در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل ۳×۲ با نرم‌افزار SAS آنالیز شدند.

یافته‌ها: ارتفاع تاج پرندگانی که با جیره‌های حاوی ۸ و ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه شده ال-آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). قطر ساق پا پرندگانی که با جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال-آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). درصد تخم‌گذاری پرندگانی که جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه‌شده ال-آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). ضریب تبدیل خوراک پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره‌های حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطوح توصیه شده و ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین کاهش یافت ($P < ۰/۰۵$). شاخص شکل تخم‌مرغ پرندگانی که جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه‌شده ال-آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). مقاومت پوسته تخم‌مرغ پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس با سطوح توصیه شده و ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره‌های حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال-آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$).

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این آزمایش، افزودن ۱۶ میلی‌گرم مس بر کیلوگرم با ۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر از حد توصیه شده ال-آرژنین به جیره مرحله تولید مرغ‌های تخم‌گذار اثرات مثبتی بر عملکرد شاخص‌های کیفی تخم‌مرغ دارد و می‌تواند شاخص‌های بلوغ فیزیولوژیکی در این محدوده سنی را بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: ال-آرژنین، بلوغ جنسی، عملکرد تولیدی، مس، مرغ تخم‌گذار

مقدمه

با پیشرفت علم و فعالیت‌های اصلاح نژادی در راستای تولید بیشتر، احتیاجات تغذیه‌ای پرندگان افزایش یافته است، به گونه‌ای که مدیریت و تغذیه اثرات عمده‌ای بر بهبود سلامت و رشد مرغ‌های تخم‌گذار دارند و منجر به افزایش یکنواختی گله و استفاده کارآمد از خوراک می‌شوند (Bahry *et al.*, 2023). پرورش‌دهندگان مرغ تخم‌گذار دائماً به‌دنبال بهبود سودآوری خود از طریق افزایش تولید تخم مرغ، بهبود سیستم ایمنی و کیفیت تخم‌مرغ هستند که می‌تواند بر درک و میزان خرید مصرف‌کنندگان تأثیر بگذارد (Shokrani *et al.*, 2024). امروزه

مرغ‌های تخم‌گذار در معرض خطر ابتلا به مشکلات اسکلتی مانند پوکی استخوان در طول دوره تولید هستند. برای کاهش مشکلات تغذیه‌ای و اسکلتی، مواد معدنی و اسیدهای آمینه دو جزء اصلی در جیره مرغ‌های تخم‌گذار هستند که نیاز به توجه ویژه دارند (Santos *et al.,* 2024). در سال‌های اخیر، کیفیت مرغ‌های تخم‌گذار در اوایل فاز تولید به یک موضوع تحقیقاتی موردتوجه روزافزون با هدف یافتن یک تعریف مشخص و روش‌های تعیین کمی کیفیت مرغ‌های تخم‌گذار تبدیل شده است تا بتوان مرغ‌های با پتانسیل رشد خوب مانند اندازه و طول بدن با وزن مناسب در اوایل مرحله تولید برای داشتن دوره تولیدی مداوم پرورش داد (Cui *et al.,* 2019).

مواد معدنی کم‌مصرف کمتر از ۰/۱ درصد وزن یک موجود زنده را تشکیل می‌دهند اما به‌طور مستقیم بر سلامت دستگاه گوارش، متابولیسم و عملکرد رشد طیور تأثیر می‌گذارند (Godswill *et al.,* 2020). مواد معدنی کمیاب مانند عنصر مس از لحاظ متابولیسمی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی بدن مانند سوپراکسید دیسموتاز، سیتوکروم اکسیداز و لیزیل اکسیداز یا سرولوپلاسمین نقش دارند و به‌عنوان کوفاکتور برای سنتز خون، ساختار هورمون‌ها، عملکرد تولید مثلی طبیعی، سنتز ویتامین‌ها و یکپارچگی و حفظ سیستم ایمنی مورد نیاز هستند (Abdulrazzaq *et al.,* 2019). افزودن منابع مس از لحاظ فیزیولوژیکی می‌تواند مورفولوژی مخاط روده را بهبود ببخشد، و ممکن است در بهبود قابلیت دسترسی به مواد مغذی از طریق افزایش تعداد، مساحت کل و اندازه سلول‌های جامی و ضخامت مخاط روده موثر باشد و بر عملکرد طیور تاثیرگذار باشد (Zhu *et al.,* 2017). گزارش شده است که تغذیه ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام مس بر سطح استرادیول سرم خون و مصرف خوراک مرغ‌های تخم‌گذار تأثیرگذار بود (Bello *et al.,* 2017). دئو و همکاران (Deo *et al.,* 2018) گزارش کردند که افزودن ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سولفات مس در جیره جوجه‌های گوشتی باعث بهبود رشد، راندمان تبدیل خوراک و عملکرد لاشه شد. در مطالعه‌ای گزارش شد که مقاومت استخوان در برابر شکستگی، نسبت وزن و حجم استخوان‌های ران (فمور) مرغ در پاسخ به افزودن ۵۰ میلی‌گرم سولفات مس در کیلوگرم در جیره جوجه‌های گوشتی افزایش یافت (Scott *et al.,* 2018). همان‌طور که مشخص است، تشکیل ماهیچه در طول زندگی با رشد عروق تقویت می‌شود، که در ایجاد بسیاری از فیبرهای عضلانی این عمل مفید است و تحریک تکثیر سلولی توسط مس ممکن است دلیل بهبود عملکرد رشد مرغ‌ها شود (Mroczek-Sosnowska *et al.,* 2016). ایبراهیم و همکاران (Ibrahim *et al.,* 2024) گزارش کردند که افزودن ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس باعث افزایش تولید و ویژگی‌های پوسته تخم‌مرغ شد، اما وزن تخم‌مرغ و مصرف خوراک را کاهش داد.

آرژنین به‌عنوان یک اسیدآمینه ضروری نقش بسیار مهمی را در فعالیت های متابولیکی بدن ایفا می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از سطوح بالاتر آرژنین نسبت به لیزین در جیره‌های طیور باعث افزایش درصد تولید تخم‌مرغ می‌شود. آرژنین توانایی تولید نیتریک اکسید را دارد، و این آمینواسید قادر به پاکسازی رادیکال‌های آزاد از خون، بهبود عملکرد سیگنال‌های سلول‌های عضلانی، رهاسازی هورمون رشد، حمایت از کلسترول خوب و تنظیم متابولیسم چربی و سطح نمک در بدن است. یوآن و همکاران (Yuan *et al.,* 2016) گزارش دادند که افزایش سطح از ۰/۶۴ به ۱/۲۷ درصد ال–آرژنین در خوراک مرغ‌های تخم‌گذار تأثیر قابل‌توجهی در کاهش مصرف خوراک و افزایش وزن روزانه و میزان تخم‌گذاری داشت. د–لیما و همکاران (De Lima *et al.,* 2022) دریافتند که تولید تخم مرغ با اضافه شدن ۰/۳۶۱ درصد ال–آرژنین به خوراک تنها ۱۰ درصد بود، اما با اضافه‌شدن ۱/۳ درصد آرژنین تولید به ۹۷ درصد رسید. گزارش شد که تغذیه سطح ۱/۵۶ درصد ال– آرژنین باعث بهبود واحد هاو، غلظت کلسترول زرده و کاهش پروژسترون خون شد بدون این‌که اثرات منفی روی صفات عملکرد تولیدی مرغ‌های تخم‌گذار بگذارد (Kazemifard *et al*., 2017). همچنین، در آزمایشی گزارش شد که تغذیه سطوح ال–آرژنین در ۱/۱۵، ۱/۳۰ و ۱/۴۵ برابر سطح توصیه شده طبق انجمن شورای تحقیقات ملی (NRC[1]) توانست بر تولید تخم‌مرغ و صفات کیفیت تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار تأثیر بگذارد (Klondi *et al*., 2012). آرژنین نقش مهمی در متابولیسم و بیوسنتز بسیاری از ملکول‌های بدن از جمله پروتئین، کراتین، اورنیتین و غیره ایفا می‌کند. بین گونه‌های مختلف حیوانات، پرندگان بیشترین نیاز را به آرژنین دارند. این امر به‌دلیل این است که از یک سو پرندگان توانایی سنتز درون‌زادی آرژنین را ندارند و از سوی دیگر به‌دلیل سرعت رشد بالا، نیاز برای آرژنین جهت ذخیره پروتئین نیز بالا است. بنابر این، با توجه به عدم تولید درون‌زادی این اسیدآمینه و افزایش نیاز در سنین بالاتر و همچنین نقش‌های مؤثری که این آمینواسید در فعالیت‌های متابولیکی در بدن دارد، با کاهش درصد اسید آمینه جیره، میزان تولید تخم‌مرغ و وزن تخم‌مرغ کاهش می‌یابد و از طرفی چون ال–آرژنین در بدن طیور ساخته نمی‌شود، طیور بیشترین نیاز را به این اسیدآمینه دارند (Fathima *et al.,* 2024). در حال حاضر، یکی از مشکلات شایع در مزارع مرغ تخم‌گذار، ضعف در سیستم اسکلتی پرندگان است که منجر به کاهش عملکرد تولید، اختلالات حرکتی و افزایش نرخ حذف زودهنگام پیش از شروع دوره تولید حذف می‌شود. در سال‌های اخیر، مس به‌عنوان یک افزودنی مناسب در خوراک برای بهبود سیستم اسکلتی و ال–آرژنین برای افزایش تولید تخم مرغ مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به فعالیت‌های متابولیکی مختلفی که ال–آرژنین و مس در مرغ‌های تخم‌گذار دارند، به‌نظر می‌رسد که استفاده از این ترکیبات به‌صورت توأم در جیره موجب تغییرات قابل‌توجهی در بهبود صفات عملکردی و کیفی تخم‌مرغ و تقویت سیستم اسکلتی مرغ‌های تخم‌گذار می‌شود. لذا، هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر مس و ال–آرژنین بر عملکرد، بلوغ فیزیولوژیکی و کیفیت تخم مرغ در آغاز دوره تولید مرغ‌های تخم‌گذار بود.

[1] National Research Council

مواد و روش‌ها

این پژوهش در شرکت کشت و صنعت پرطلا در شهرستان علی‌آباد کتول استان گلستان در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲ انجام شد. تعداد ۲۸۸ قطعه مرغ تخم‌گذار سویه‌های‌لاین W-80 از سن ۱۸ الی ۲۱ هفتگی در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل ۳×۲ شامل دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) و سه سطح اسیدآمینه ال–آرژنین (شامل سطح توصیه شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه شده) درون قفس پرورش داده شدند. برای هر تیمار، شش تکرار حاوی ۸ قطعه پرنده در نظر گرفته شد. اسیدآمینه ال–آرژنین با خصوصیات ۹۸/۵ درصد خلوص، پروتئین خام ۲۰۱ درصد و انرژی قابل متابولیسم ۳۲۲۰ کیلوکالری بر کیلوگرم و قابلیت هضم ۱۰۰ درصد از شرکت سی‌جی (کره جنوبی) با همکاری شرکت مرغ نوجان (ایران، تهران) تامین شد. عنصر مس از طریق منبع سولفات مس با درصد خلوص ۲۵ درصد و زیست‌فراهمی ۸۸/۵ درصد از شرکت مرک (ایالات متحده آمریکا) با همکاری شرکت‌های خوراک‌پرداز هزاره نوین و زیست‌فناوری آریانا (مشهد) تامین شد. یک جیره پایه بر اساس راهنمای مدیریت سویه تجاری مورد آزمایش تنظیم شد. برای تهیه جیره‌های آزمایشی حاوی سطوح مختلف آرژنین [توصیه شده (۰/۸۵ درصد جیره)، ۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر از توصیه شده (به‌ترتیب ۱/۰۲ و ۱/۱۹ درصد جیره)]، ال–آرژنین به‌ترتیب در صفر، ۰/۱۷۲ و ۰/۳۴۵ درصد جایگزین قسمت ماسه (فیلر) شد. برای تهیه جیره‌های آزمایشی با محتویات مس مختلف (۸ و ۱۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، سولفات مس کریستالی به‌مقدار ۳۶/۱۶ گرم برکیلوگرم و ۷۲/۳۲ گرم بر کیلوگرم به جیره پایه اضافه شد (جدول ۱). همچنین، مقدار مس و اسیدآمینه ال–آرژنین در اقلام جیره و خوراکی نهایی سنجیده شد. تجزیه و تحلیل مشخصات اسید آمینه‌های توسط بازتاب منتشر مادون قرمز نزدیک (NIR[2]) و مواد معدنی توسط طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS[3]) انجام شد (Saini & Wratten, 1987; Paul *et al*., 2014). جیره‌های آزمایشی ابتدا با مخلوط کردن تمام مواد به‌جز سولفات مس و ال–آرژنین آماده شدند. به‌طور جداگانه، تیمارهای آزمایشی به دو قسمت تقسیم شدند و سپس هر قسمت با سولفات مس در سطوح ۸ و ۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ال–آرژنین با سایر مواد با استفاده از دست مخلوط و به جیره اضافه شدند. سولفات مس و ال–آرژنین با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی حساس با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. برنامه نوری بر اساس دستورالعمل پرورش مرغ تخم‌گذار سویه‌های لاین W-80 به‌صورت ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی تنظیم شد. شدت نور در سطح چشم پرندگان با استفاده از نورسنج مجهز به گیرنده نوری (مدل DT-1301، چین) اندازه‌گیری شد و ۳۰ لوکس (سه فوت کندل) تنظیم گردید. درجه حرارت سالن در محدوده ۲۴–۲۲ درجه سانتیگراد با دمای آب حدود ۲۴–۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰–۷۰ درصد تا پایان دوره آزمایش ثابت نگه‌داشته شدند.

سن تولید اولین تخم مرغ یا علامت‌گذاری (سن ۱۸ هفتگی) و سن ۵۰ درصد تولید تخم‌مرغ (سن ۲۱ هفتگی) برای تمام تیمارها در طول دوره آزمایش برای تعیین زمان بلوغ یک مرغ تخم‌گذار ثبت شد. یکنواختی گله به‌عنوان نسبت انحراف استاندارد (σ) به میانگین (μ) برای هر گله در ±۱۰ درصد از میانگین وزن بدن محاسبه شد. تخم‌مرغ‌های تولید شده روزانه جمع‌آوری و پس از توزین، درصد تخمگذاری، مصرف خوراک، ضریب تبدیل، میانگین وزن تخم‌مرغ و شاخص شکل تخم‌مرغ به‌طور هفتگی محاسبه شدند. صفات کیفی تخم مرغ در هردو هفته یکبار (دو روز پایانی) اندازه‌گیری شدند. در دو روز انتهای هر هفته، تخم مرغ‌های تولیدی هر واحد آزمایشی جمع‌آوری شدند و از نظر صفاتی نظیر ضخامت پوسته، وزن پوسته، وزن سفیده، واحد هاو و غیره مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تعیین وزن پوسته، پس از شکستن تخم‌مرغ‌ها و تخلیه محتویات سفیده و زرده، پوسته‌های آن‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا کاملاً خشک شوند. سپس با استفاده از ترازوی دیجیتالی حساس با دقت ۰/۰۱ گرم وزن پوسته اندازه گیری شد و میانگین وزن پوسته‌های خشک شده بر حسب گرم به‌عنوان وزن پوسته هر واحد آزمایشی منظور شد. برای تعیین ضخامت پوسته از دستگاه ضخامت‌سنج عقربه‌ای (مدل Ultrasonic FH Thickness Gauge Echometer-1062، ژاپن) استفاده شد که از هر چهار طرف تخم‌مرغ یعنی دو پهنا و دو قطر آن تکه‌ای با دقت جدا گردید و ضخامت هر چهار نقطه با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع سفیده، از دستگاه ارتفاع‌سنج (مدل Egg Multi Tester-5200، ژاپن) استفاده شد. جهت اندازه‌گیری ارتفاع و عرض و قطر تخم مرغ از کولیس ورنیه (گستره ۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر، مدل P150، ژاپن) استفاده شد. مقاومت پوسته تخم‌مرغ (بر حسب کیلوگرم نیرو) با استفاده از دستگاه مقاومت‌سنج دیجیتالی (مدل EG-001، ژاپن) با دقت ۰/۰۲ ± درصد اندازه‌گیری شد (Akbari *et al.,* 2016). مصرف خوراک در هر واحد آزمایشی به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری شد. مصرف خوراک واحدهای آزمایشی از کسر خوراک مصرف‌شده در انتهای دوره از خوراک اختصاص داده‌شده در شروع دوره، بر مبنای روز جوجه محاسبه شد. در پایان ۲۱ هفتگی، متغیرهای بلوغ شامل وزن و طول بدن، طول و عرض شانه، طول منقار (بالا و پایین)، طول گردن، طول بال، طول و قطر ساق پا، طول انگشتان پا و طول سیخک اندازه‌گیری شدند. وزن زنده بدن بر حسب کیلوگرم بر روی ترازو با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. برای تعیین طول بدن، مرغ‌ها به‌سمت شکمی خوابانده شدند و گردن و پای راست کاملاً کشیده شد. طول بدن به‌عنوان فاصله از نوک منقار تا نقطه انتهایی ناخن روی انگشت بلند تعریف شد. طول بال از مفصل کتف تا آخرین رقم بال (شاه‌پر) در نظر گرفته شد. طول ساق به‌عنوان طول تارس–متاتارس از مفصل هاک تا پد متاتارس در نظر گرفته شد. طول انگشت پا به‌عنوان طول انگشت بلند از چین متاتارس تا آخرین فالانژ انگشت اندازه‌گیری شد. طول بدن و طول بال‌ها بر حسب سانتی‌متر بر روی خط‌کش اندازه‌گیری شد. ارتفاع و طول شانه، طول منقار

[2] Near Infrared Spectroscopy

[3] Atomic absorption spectroscopy

بالا و پایین، طول گردن، طول انگشت، طول و قطر ساق پا از تارس–متاتارسوس درست زیر خار تعیین شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع شانه هر پرنده، سنبله چهارم از جلوی شانه از نوک سنبله تا پایه سر اندازه‌گیری شد. طول شانه از محل اتصال شانه در پایه سر تا منحنی آخرین سنبله با استفاده از کولیس ورنیه (مدل P150، گستره ۰–۱۵۰ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد (Rouhanipour *et al.*, 2025).

قبل از آنالیز واریانس، نرمال بودن داده‌های حاصل با آزمون Shapiro-Wilk و Proc univariate بررسی شد و داده‌ها پس از تبدیلات لازم و مرتب‌سازی با نرم‌افزار (Excel، نسخه ۲۰۲۴) و با استفاده از نرم‌افزار آماری (SAS، نسخه ۹/۴)، به‌صورت در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل۳×۲ و با رویه مدل‌های خطی عمومی (General Liner Models) برای رابطه ۲ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. میانگین‌ها به کمک آزمون توکی در سطح معنی‌داری پنج درصد مقایسه شدند.

$$Yijk = \mu + Ai + Bj + Bl + ABij + eijk \quad \text{رابطه ۲)}$$

که در این رابطه، Y_{ijK}، مقدار مشاهده تیمار iام در تکرار jام؛ μ، میانگین مشاهدات؛ A_i، اثر سطح مصرف مس؛ B_j، اثر سطح مصرف اسید آمینه ال–آرژنین؛ Bl، اثر بلوک؛ AB_{ij}، اثر متقابل بین دو فاکتور مس و اسید آمینه ال–آرژنین و e_{ijk}، خطای آزمایشی هستند.

جدول ۱– مواد خوراکی و ترکیبات شیمیایی جیره‌های آزمایشی

Table 1. Ingredients and nutrient composition of the experiment diets

ماده خوراکی Ingredient	مقدار (درصد)
ذرت (۷/۲۰ درصد پروتئین) Corn (7.20 % protein)	57.33
کنجاله سویا (۴۴/۵۴ درصد پروتئین) Soybean meal(44.54 % protein)	11.86
سبوس گندم (۱۶/۳۷ درصد پروتئین) Wheat Bran (16.37 % protein)	1.71
گلوتن ذرت (۴۰/۰۰ درصد پروتئین) Corn gluten (40.00 % protein)	11.00
کنجاله کلزا (۳۷/۰۹ درصد پروتئین) Rapesseed meal (37.09 % protein)	1.20
روغن کانولا Canola oil	4.00
دی کلسیم فسفات Di-calcium phosphate	2.02
سنگ آهک Limestone	9.13
پرمیکس ویتامینی و معدنی[1] Vitamin and Mineral permix[1]	0.50
دی–ال متیونین DL-Methionine	0.14
ال–لیزین L-lysine	0.38
ال–آرژنین L-Arginine	0.04
نمک Salt	0.24
جوش شیرین Sodium bicarbonate	0.20
ماسه (پرکننده) Sand (filler)	0.35
جمع Total	100.00
ترکیبات شیمیایی محاسبه شده Calculated chemical compositions	
انرژی متابولیسمی[2] (مگاکالری/کیلوگرم) Metabolizable energy[2] (mcal/kg)	2950
پروتئین خام (گرم در کیلوگرم) CP (g/kg)	17.60
کلسیم (درصد) Calcium (%)	4.00
فسفر قابل استفاده (درصد) Available phosphorus (%)	0.45
سدیم (درصد) Na (%)	0.18
کلر (درصد) Cl (%)	0.18
آرژنین (درصد) Arginine (%)	0.85
لیزین (درصد) Lysine (%)	0.82
متیونین (درصد) Methionine (%)	0.45
متیونین+ سیستین (درصد) Methionine + cysteine (%)	0.75
ترئونین (درصد) Threonine (%)	0.57
والین (درصد) Valine (%)	0.74
فنیل‌آلانین (درصد) Phenylalanine (%)	0.86
هیستیدین (درصد) Histidine (%)	0.40
تریپتوفان (درصد) Tryptophan (%)	0.14
لوسین (درصد) Leucine (%)	1.96
ایزولوسین (درصد) Isoleucine (%)	0.62
مواد مغذی اندازه‌گیری شده Measured Nutrients	
پروتئین خام (درصد) Crude Protein (%)	16.65
چربی خام (درصد) Crude fat (%)	5.96
ال–آرژنین (درصد) L-Arginine (%)	0.83
مس (میلی‌گرم/کیلوگرم ماده خشک) Cu (Mg/kg DM)	2.50

[1]برای تهیه جیره‌های آزمایشی حاوی سطوح مختلف آرژنین [توصیه شده (۰/۸۵ درصد جیره)، ۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر از توصیه شده (به‌ترتیب ۱/۰۲ و ۱/۱۹ درصد جیره)]، ال–آرژنین (با خلوص ۹۸/۵ درصد) به‌ترتیب در صفر، ۰/۱۷۲ و ۰/۳۴۵ درصد جایگزین قسمت ماسه (فیلر) شد. برای تهیه جیره‌های آزمایشی با محتویات مس مختلف (۸ و ۱۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، سولفات مس کریستالی (خلوص ۲۵ درصد، فراهمی زیستی ۸۸/۵ درصد، مرک، ایالات متحده آمریکا) به مقدار ۳۶/۱۶ گرم بر کیلوگرم و ۷۲/۳۲ گرم بر کیلوگرم به جیره پایه اضافه شد.

[1] To prepare experimental diets containing different levels of arginine [recommended (0.85% diet), 20 and 40% higher than recommended (1.02 and 1.19% diet, respectively)], L-arginine (98.5 % purity, CJ group of South Korea) was substituted for the filler (sand) portion at 0, 0.172 and 0.345%, respectively. To prepare experimental diets with different copper contents (8 and 16 mg/kg), crystalline copper sulfate (25% purity, 88.5% bioavailability, Merck, USA) was added to the diets in amounts of 36.16 and 72.32 g/kg.

[2]میزان ویتامین‌ها در هر هزار کیلوگرم جیره شامل: ۸۰۰۰ واحد بین المللی ویتامین A، ۳۳۰۰ واحد بین المللی ویتامین D3، ۲۰ گرم ویتامین E، ۲/۵ گرم ویتامین K3 (منادیون)، ۲/۵گرم ویتامین B1، ۵/۵ گرم ویتامین B2، ۳۰ گرم ویتامین B3 (نیاسین)، ۸ گرم ویتامین B5 (د–کلسیم پنتوتنات)، ۴ گرم ویتامین B6 ، ۷۵ میلی‌گرم ویتامین B7، ۰/۹ گرم ویتامین B9، ۲۳ میلی‌گرم ویتامین B12. میزان مواد معدنی در هر هزار کیلوگرم جیره شامل: ۹۰ گرم منگنز، ۴۰ گرم آهن، ۸۰ گرم روی، ۰ گرم مس، ۱/۲ گرم ید، ۰/۲۲ گرم سلنیوم.

[2] Vitamin and mineral Premix supplied per kilogram of diet: Vitamin A, 8000 IU; Vitamin D3, 3300 IU; Vitamin E, 20 IU; Vitamin K3, 2.5 mg; thiamin, 2.5 mg; riboflavin, 5.5 mg; Niacin, 30 mg; D-Calcium pantothenate, 8 mg; Vitamin B6, 4 mg; Biotin, 0.1 mg; Folic acid, 0.9 mg; Vitamin B12, 23 mg; Choline 500 mg; manganese oxide 90 mg; ferrous sulfate 40 mg; zinc oxide 80 mg; copper sulfate, 0 mg; calcium iodate, 1.2 mg; sodium selenite, 0.22 mg.

نتایج و بحث

تأثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر یکنواختی و تغییرات وزن بدن مرغ‌های تخم‌گذار در جدول (۲) گزارش شده است. تغذیه پرندگان با جیره سطح ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم مس و سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین نسبت به سایر جیره‌های آزمایشی به جز جیره حاوی سطح ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم مس و سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین سبب افزایش تغییرات وزن بدن شد (P < ۰/۰۵). تغذیه پرندگان با جیره ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم مس و سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم مس با سطح توصیه شده ال–آرژنین درصد یکنواختی را افزایش داد (P < ۰/۰۵).

جدول ۲- تاثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر تغییرات وزن بدن و یکنواختی مرغ‌های تخم‌گذار (۱۸ تا ۲۱ هفتگی)

Table 2. Effects of different levels of Copper and L-arginine supplementation on the uniformity and variation of body weight in laying hens (18-21 weeks of age).

تیمار[1] Treatment[1]	تغییرات وزن بدن (گرم) Variation of body weight (g)	یکنواختی (درصد)۲ Uniformity (%)2
مس (میلی‌گرم/کیلوگرم) Copper (mg/kg)		
۸ 8	1235	88
۱۶ 16	1240	89
SEM	5.9	0.8
ال–آرژنین (درصد) L-arginine (%)		
توصیه شده RHL	1276[b]	87[b]
۲۰ درصد بالاتر LA20	1302[a]	87[b]
۴۰ درصد بالاتر LA40	1282[ab]	92[a]
SEM	10.1	10.5
امس × ال–آرژنین Copper × L-arginine		
۸ × توصیه شده 8 × RHL	1220[b]	89[ab]
۸ × ۲۰ درصد بالاتر 8 × LA20	1238[b]	86[ab]
۸ × ۴۰ درصد بالاتر 8 × LA40	1248[ab]	91[ab]
۱۶ × توصیه شده 16 × RHL	1270[b]	85[b]
۱۶ × ۲۰ درصد بالاتر 16 × LA20	1286[a]	88[ab]
۱۶ × ۴۰ درصد بالاتر 16 × LA40	1206[b]	93[a]
SEM	10.4	1.5
منبع تغییر Variation Source	(*P*-value)	
مس Copper	0.576	0.910
ال–آرژنینL-arginine	0.001	0.004
مس × ال–آرژنین Copper × L-arginine	0.0007	0.026

[a-b] تفاوت ارقام در هر ستون با حروف نامشابه، معنی‌دار است ($P < ۰/۰۵$).

[a-c] Means with different lowercase letters in rows are significantly different ($P < 0.05$).

SEM*: خطای استاندارد میانگین‌ها.

*SEM: Standard error of the mean.

[1] مرغ‌های تخم‌گذار سه سطح اسیدآمینه ال–آرژنین (شامل سطح توصیه شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه شده) و دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) را از منبع سولفات مس دریافت کردند.

[1] The laying hens were assigned to three levels of LA (recommended level according to hy-line=RHL, as well as 20% higher=LA20 and 40% higher=LA40 than the recommended level) and with two levels of a supplemental Cu (8 and 16 mg/kg in diet) form of copper sulfate in the diet to provide the copper.

[۲] یکنواختی گله به‌عنوان نسبت انحراف استاندارد (σ) به میانگین (μ) برای هر گله در ۱۰± درصد از میانگین وزن بدن محاسبه شد.

[2] Flock uniformity calculated as the ratio of the standard deviation (σ) to the mean (μ) for each flock within ± 10% of the mean body weight.

تاثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر متغیرهای بلوغ فیزیولوژیکی در مرغ‌های تخم‌گذار در جدول (۳) گزارش شده است. ارتفاع تاج پرندگانی که با جیره‌های حاوی ۸ و ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه شده ال–آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). عرض تاج پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه شده ال–آرژنین و ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). طول نوک بالا پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). طول نوک پایین و طول گردن پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). قطر ساق پای پرندگانی که با جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). تغذیه پرندگان با جیره ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم مس نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، میانگین طول بال پرندگان را افزایش داد (P < ۰/۰۵).

تأثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر صفات عملکردی تولیدی مرغ‌های تخم‌گذار در جدول (۴) گزارش شده است. تیمارهای آزمایشی تاثیری بر توده تخم‌مرغ نداشتند

(P > ۰/۰۵). درصد تخم‌گذاری پرندگانی که جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس را با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه شده ال-آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵). مصرف خوراک روزانه پرندگانی که جیره‌های حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطوح توصیه شده و سطح ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس همراه ۲۰ درصد بالاتر ال-آرژنین دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین کاهش یافت (P < ۰/۰۵). ضریب تبدیل خوراک پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره‌های حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال-آرژنین کاهش یافت (P < ۰/۰۵). میانگین وزن تخم مرغ پرندگانی که با جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات افزایش یافت (P < ۰/۰۵). همچنین، میانگین وزن تخم مرغ در پرندگانی که با جیره حاوی سطح توصیه شده ال-آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی سطح ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین افزایش یافت (P < ۰/۰۵).

جدول ۳- تاثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر بلوغ فیزیولوژیکی مرغ‌های تخم‌گذار (۱۸ تا ۲۱ هفتگی)

Table 3. Effects of different levels of Copper and L-arginine supplementation on physiological maturation in laying hens (18-21 weeks of age).

طول سیخک (میلی‌متر) Claw length (mm)	میانگین طول انگشتان کوچک (میلی‌متر) Average finger length (mm)	طول انگشت بلند (میلی‌متر) Big finger length (mm)	قطر ساق پا (میلی‌متر) Shank diameter (mm)	طول ساق پا (میلی‌متر) Shank length (mm)	میانگین طول بال (سانتی‌متر) Average wing length (cm)	طول گردن (میلی‌متر) Neck length (mm)	طول نوک پایین (میلی‌متر) Down beak length (mm)	طول نوک بالا (میلی‌متر) Top beak length (mm)	عرض تاج (میلی‌متر) Comb length (mm)	ارتفاع تاج (میلی‌متر) Comb height (mm)	طول بدن (سانتی‌متر) Body length (cm)	تیمار[1] Treatment
												مس (میلی‌گرم/کیلوگرم) Copper (mg/kg)
28.46	45.16	64.51	11.91	81.31	17.68[b]	106.72	13.41[b]	22.03	83.07[b]	60.16[b]	63.02	۸ 8
28.17	45.01	64.58	11.74	80.46	18.15[a]	106.94	13.92[a]	22.10	86.24[a]	64.25[a]	63.38	۱۶ 16
0.221	0.265	0.298	0.065	0.332	0.110	0.701	0.110	0.154	1.132	1.187	0.176	SEM
												ال–آرژنین (درصد) L-arginine (%)
28.28	44.60	64.27	11.72	80.63	17.81	107.07	13.62	21.87[ab]	79.32[b]	56.37[b]	63.26	توصیه شده RHL
28.16	45.13	64.45	11.90	80.91	17.92	106.21	13.88	22.48[a]	86.49[ab]	58.09[ab]	63.46	۲۰ درصد بالاتر LA20
28.51	45.52	64.92	11.85	81.14	17.99	107.21	13.51	21.85[b]	88.16[a]	72.15[a]	62.87	۴۰ درصد بالاتر LA40
0.276	0.321	0.354	0.088	0.401	0.132	0.865	0.132	0.187	1.398	1.443	0.210	SEM
												امس × ال–آرژنین Copper × L-arginine
28.25	44.51	64.74	11.95[ab]	81.53	17.58	108.82[ab]	13.52[ab]	21.74[ab]	84.12[b]	53.93[b]	63.39	۸ × توصیه شده RHL × 8
28.51	45.51	63.98	11.75[ab]	80.90	17.73	104.60[b]	13.29[b]	21.77[ab]	83.86[bc]	57.53[ab]	63.31	۸ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 8
28.60	45.45	64.83	12.03[a]	81.50	17.72	106.75[ab]	13.44[ab]	22.58[ab]	81.24[bc]	69.01[a]	62.35	۸ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 8
28.30	44.69	63.80	11.86[ab]	80.29	18.05	105.32[ab]	13.71[ab]	21.99[ab]	88.87[ab]	58.80[ab]	63.12	۱۶ × توصیه شده RHL × 16
28.42	45.60	65.02	11.42[b]	79.73	18.27	107.68[ab]	13.58[ab]	21.13[b]	77.41[c]	58.68[ab]	63.39	۱۶ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 16
27.79	44.74	64.92	11.96[ab]	81.37	18.12	107.82[a]	14.48[a]	23.18[a]	92.46[a]	75.30[a]	63.62	۱۶ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 16
0.398	0.454	0.500	0.110	0.576	0.198	1.210	0.187	0.265	1.966	2.044	0.300	SEM
----------(*P*-value)----------												منبع تغییر Variation Source
0.376	0.686	0.873	0.066	0.071	0.003	0.827	0.0009	0.726	0.049	0.015	0.145	مس Copper
0.649	0.124	0.409	0.245	0.652	0.638	0.669	0.113	0.025	<0.0001	<0.0001	0.142	ال–آرژنین L-arginine
0.599	0.484	0.177	0.001	0.124	0.914	0.020	0.006	<0.0001	0.006	<0.0001	0.097	مس × ال–آرژنین Copper × L-arginine

[a-b] تفاوت ارقام در هر ستون با حروف نامشابه، معنی‌دار است (P<۰/۰۵).

[a-c] Means with different lowercase letters in rows are not significantly different (P<0.05).

SEM*: خطای استاندارد میانگین‌ها.

*SEM: Standard error of mean.

[1] مرغ‌های تخم‌گذار سه سطح اسیدآمینه ال–آرژنین (شامل سطح توصیه شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه‌شده) و دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) را از منبع سولفات مس دریافت کردند.

[1] The laying hens were assigned to three levels of LA (the recommended level according to hy-line=RHL, as well as 20% higher=LA20 and 40% higher=LA40 than the recommended level) and with two levels of supplemental Cu (8 and 16 mg/kg in layer diets) form of copper sulfate in the diet to provide copper.

جدول ۴- تاثیر سطوح مختلف مس و ال–آرژنین بر عملکرد تولیدی مرغ‌های تخم‌گذار (۱۸ تا ۲۱ هفتگی)

Table 4. Effects of different levels of Copper and L-arginine supplementation on production performance in laying hens (18-21 weeks of age).

ضریب تبدیل خوراک[۵] Feed conversion ratio [5]	مصرف خوراک (گرم/روز)[۴] Daily feed intake (g/hen/day)[4]	وزن توده تخم‌مرغ (گرم/روز)[۳] Egg mass (g/hen/d)[3]	میانگین وزن تخم‌مرغ (گرم) Mean egg weight (g)	درصد تخم‌گذاری (درصد)[۲] Egg production (%)[2]	تیمار[۱] Treatment[1]
					مس (میلی‌گرم/کیلوگرم) Copper (mg/kg)
3.92[a]	87.88	22.43	48.16[a]	46.58[b]	8
3.82[b]	86.98	22.78	45.67[b]	49.90[a]	16
1.065	0.645	0.576	0.532	1.010	SEM
					ال–آرژنین (درصد) L-arginine (%)
3.88[a]	87.10	22.42	48.66[a]	46.07[b]	توصیه شده RHL
3.87[ab]	86.50	22.27	46.29[ab]	48.11[ab]	۲۰ درصد بالاتر LA20
3.83[b]	88.69	23.15	45.79[b]	50.55[a]	۴۰ درصد بالاتر LA40
1.321	0.801	0.721	0.665	1.221	SEM
					امس × ال–آرژنین Copper × L-arginine
3.95[ab]	85.94[b]	21.72	49.95	43.49[b]	۸ × توصیه شده RHL × 8
3.96[a]	87.36[ab]	22.04	47.67	46.24[ab]	۸ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 8
3.84[ab]	90.34[a]	23.52	46.86	50.02[ab]	۸ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 8
3.82[ab]	88.25[ab]	23.05	47.38	48.66[ab]	۱۶ × توصیه شده RHL × 16
3.82[ab]	85.65[b]	22.44	44.91	49.98[ab]	۱۶ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 16
3.81[b]	87.04[ab]	22.84	44.72	51.08[a]	۱۶ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 16
1.854	1.120	1.021	0.932	1.710	SEM
----------(*P*-value)----------					منبع تغییر Variation Source
<0.0001	0.327	0.400	0.001	0.002	مس Copper
0.031	0.132	0.513	0.005	0.037	ال–آرژنین L-arginine
0.037	0.040	0.821	0.942	0.048	مس × ال–آرژنین Copper × L-arginine

[a-b] تفاوت ارقام در هر ستون با حروف نامشابه، معنی‌دار است ($P < ۰/۰۵$).

[a-c] Means with different lowercase letters in rows are significantly different ($P < 0.05$).

*SEM: خطای استاندارد میانگین‌ها.

*SEM: Standard error of the mean.

[۱] مرغ‌های تخم‌گذار سه سطح اسیدآمینه ال–آرژنین (شامل سطح توصیه‌شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه‌شده) و دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) را از منبع سولفات مس دریافت کردند.

[1] The laying hens were assigned to three levels of LA (the recommended level according to hy-line=RHL, as well as 20% higher=LA20 and 40% higher=LA40 than the recommended level) and with two levels of supplemental Cu (8 and 16 mg/kg in layer diets) form of copper sulfate in the diet to provide the copper.

[۲] تولید تخم مرغ = (۱۰۰ × تعداد تخم‌گذاری) / (تعداد مرغ × روز).

[2] Egg production = (100 × number of eggs laid) / (number of hens × days).

[۳] توده تخم مرغ = (تولید تخم‌مرغ × میانگین وزن تخم‌مرغ) / ۱۰۰.

[3] Egg mass = (egg production × mean egg weight) / 100.

[۴] مصرف خوراک روزانه = مقدار خوراک داده شده در هفته (گرم) – مقدار خوراک باقیمانده در پایان هفته (گرم) / تعداد روز مرغ.

[4] DFI = The amount of feed given weekly (g) - The amount of feed left at the end of the week (g) / the number of hen days.

[۵] ضریب تبدیل خوراک = (مصرف خوراک روزانه / توده وزن تخم مرغ)

[5] FCR = (Daily feed intake / Egg mass)

اثر تیمارهای آزمایشی در دوره تولید مرغ‌های تخم‌گذار بر روی صفات کیفی تخم مرغ شامل شاخص شکل تخم مرغ، شاخص زرده، درصد سفیده، واحد هاو، وزن پوسته، میانگین ضخامت پوسته، درصد پوسته، مقاومت پوسته و وزن مخصوص تخم مرغ در جدول (۵) نشان داده شده است. شاخص شکل تخم مرغ پرندگانی که جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین را دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح توصیه شده ال–آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). واحد هاو تخم مرغ پرندگانی که جیره‌های حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطوح توصیه شده ال–آرژنین را دریافت کردند نسبت به جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). مقاومت پوسته تخم مرغ پرندگانی که جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس با سطوح توصیه شده و ۴۰ درصد بالاتر ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره‌های حاوی حاوی ۸ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس با سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). درصد سفیده تخم مرغ پرندگانی که با جیره حاوی ۱۶ میلی‌گرم درکیلوگرم سولفات مس تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی ۸ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$). وزن پوسته و میانگین ضخامت پوسته تخم مرغ پرندگانی که با جیره حاوی سطح توصیه شده ال–آرژنین تغذیه شدند نسبت به جیره حاوی سطح ۲۰ درصد بالاتر ال–آرژنین افزایش یافت ($P < ۰/۰۵$).

جدول ۵- تاثیر سطوح مختلف مس و ال-آرژنین بر صفات کیفی تخم مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار (۱۸ تا ۲۱ هفتگی)

Table 5. Effects of different levels of Copper and L-arginine supplementation on egg physiological traits in laying hens (18-35 weeks of age).

وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مربع)[۶] Egg special weight (g/cm^2)[6]	مقاومت پوسته تخم‌مرغ (کیلوگرم نیرو) Egg Shell Strength (kgf)	درصد پوسته (درصد) Shell percent (%)	میانگین ضخامت پوسته (میلی‌متر)[۵] Mean shell thickness (mm)[5]	وزن پوسته (گرم) Shell weight (g)	واحد هاو Haugh unit[4]	درصد سفیده (درصد) Albumin percent (%)	شاخص زرده (میلی‌متر)[۳] Yolk index (mm)[3]	شاخص شکل تخم‌مرغ[۲] Egg Shape index[2]	تیمار[۱] Treatment[1]
									مس (میلی‌گرم/کیلوگرم) Copper (mg/kg)
0.99	4.90^{b}	10.67	0.46	5.56	79.26^{b}	64.28^{b}	42.97	76.69	8
1.00	5.08^{a}	10.56	0.47	5.69	80.30^{a}	65.42^{a}	42.52	76.52	16
0.012	0.123	0.110	0.005	0.065	0.987	0.287	0.432	0.298	SEM
									ال-آرژنین (درصد) L-arginine (%)
1.00	5.01	10.76	0.47^{a}	5.75^{a}	80.73	64.73	42.71	76.54	توصیه شده RHL
0.99	4.79	10.43	0.44^{b}	5.47^{b}	78.73	64.90	43.18	76.29	۲۰ درصد بالاتر LA20
0.99	5.17	10.66	0.46^{ab}	5.67^{ab}	79.90	64.92	42.34	76.97	۴۰ درصد بالاتر LA40
0.013	0.144	0.142	0.0079	0.087	1.201	0.356	0.532	0.367	SEM
									مس × ال-آرژنین Copper × L-arginine
1.00	4.95^{ab}	10.87	0.46	5.74	80.01^{ab}	64.01	42.93	73.53^{b}	۸ × توصیه شده RHL × 8
0.97	4.77^{b}	10.48	0.44	5.39	77.90^{ab}	64.21	43.42	76.41^{ab}	۸ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 8
0.99	4.98^{ab}	10.67	0.45	5.55	79.88^{ab}	64.61	42.57	77.11^{a}	۸ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 8
1.00	5.07^{a}	10.65	0.47	5.75	81.45^{a}	64.44	42.49	76.55^{ab}	۱۶ × توصیه شده RHL × 16
1.01	4.81^{ab}	10.38	0.43	5.55	79.55^{b}	65.58	42.95	76.17^{ab}	۱۶ × ۲۰ درصد بالاتر LA20 × 16
0.98	5.36^{a}	10.65	0.46	5.78	79.91^{ab}	65.22	42.10	76.83^{ab}	۱۶ × ۴۰ درصد بالاتر LA40 × 16
0.021	0.201	0.197	0.009	0.112	1.700	0.498	0.756	0.512	SEM
---------- (*P*-value)----------									منبع تغییر Variation Source
0.526	0.028	0.498	0.723	0.178	0.046	0.008	0.464	0.697	مس Copper
0.753	0.186	0.256	0.012	0.044	0.505	0.913	0.532	0.418	ال-آرژنین L-arginine
0.311	0.048	0.876	0.934	0.632	0.047	0.654	0.998	0.042	مس × ال-آرژنین Copper × L-arginine

[a-b] تفاوت ارقام در هر ستون با حروف نامشابه، معنی‌دار است ($P < ۰/۰۵$).

[a-c] Means with different lowercase letters in rows are significantly different ($P < 0.05$)

SEM*: خطای استاندارد میانگین‌ها.

*SEM: Standard error of mean.

[۱] مرغ‌های تخم‌گذار سه سطح اسیدآمینه ال-آرژنین (شامل سطح توصیه‌شده توسط راهنمای سویه، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد بالاتر از سطح توصیه‌شده) و دو سطح عنصر مس (شامل ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خوراک) که از منبع سولفات مس دریافت کردند.

[1] The laying hens were assigned with three levels of LA (the recommended level according to hy-line=RHL, as well as 20% higher = LA20 and 40% higher=LA40 than the recommended level) and with two levels of supplemental Cu (8 and 16 mg/kg in layer diets) form of copper sulfate in the diet to provide the copper.

[۲] شاخص شکل تخم‌مرغ= [عرض تخم‌مرغ (میلی متر) / ارتفاع تخم‌مرغ (میلی متر)] × ۱۰۰

[2] Egg Shape index = [Egg width (mm) / Egg height (mm)] × 100

[۳] شاخص زرده= ارتفاع زرده (میلی متر) / قطر زرده (میلی متر) × ۱۰۰

[3] Yolk index = Yolk height (mm) / Yolk diameter (mm) × 100

[۴] واحد هاو با فرمول ($HU = 100 \text{ Log } (H + 7.57 - 1.7 \times EW^{0.37})$، که در آن H = ارتفاع آلبومین (میلی‌متر) و EW = وزن تخم‌مرغ (گرم) محاسبه شد.

[4] The HU was calculated by the formula $HU = 100 \text{ Log } (H + 7.57 - 1.7 \times W^{0.37})$, where H = albumen height (mm) and W = egg weight (g).

[۵] درصد پوسته تخم مرغ= وزن پوسته (گرم) / وزن تخم مرغ (گرم) × ۱۰۰

[5] Egg shell percentage = Shell weight (g) / Egg weight (g) × 100

[۶] وزن مخصوص تخم مرغ= وزن تخم‌مرغ (گرم) / حجم تخم مرغ (سانتی‌متر مربع) (۳/۱۴۱۵ تقسیم بر ۶ × عرض تخم‌مرغ^{۲})

[6] Egg special weight = Egg weight (g) / Egg volume (cm^2) ($3.1415/6 \times \text{egg width}^{\wedge 2}$)

هدف پرورش‌دهندگان مرغ تخم‌گذار حفظ کل گله در میانگین وزن بدن استاندارد و یکنواختی بالا در زمان تخم‌گذاری است (Ansari Pirsaraei *et al.*, 2022). یکنواختی را می‌توان به عنوان تغییرات وزن بدن در طول دوره تخم‌گذاری و به عنوان درصد پرندگان در ۱۰ درصد از میانگین وزن بدن تعریف کرد. اوج پایین تولید در گله‌های غیر یکنواخت به‌دلیل تنوع در بلوغ است که منجر به تاخیر در شروع تولید در مرغ‌های سبک و تسریع تولید در مرغ‌های سنگین می‌شود (Sweeney *et al.*, 2022). میلیسیتس و همکاران (Milisits *et al.*, 2021) گزارش کردند که یکنواختی وزن بدن (۸۹ درصد در مقابل ۸۰ درصد) بر عملکرد تولیدی و تلفات در طول ۱۰ هفته اول تخم‌گذاری تأثیر قابل‌توجهی داشت. رفع این مشکل به‌طور کامل غیر ممکن است، اما ممکن است به‌طور قابل‌توجهی از طریق تغییر در سطح مواد مغذی ارائه شده در طول دوره تخم‌گذار به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. یکی از مهمترین مسیرهای سیگنالی که توسط اسیدآمینه آرژنین ایجاد می‌شود، هدف پستانداران مسیر راپامایسین (mTOR[4]) است که در رشد سلولی و تحریک ترشح هورمون‌های رشد، مانند فاکتور رشد شبه انسولین–۱ (IGF-1[5]) و پرولاکتین، نقش دارد (Latour *et al.*, 2020). مسیر mTOR یک مسیر پیام‌رسانی سلولی ضروری و یک پروتئین سرین/ترئونین کیناز است که در تعدادی از عملکردهای فیزیولوژیکی مهم از جمله رشد سلولی، تکثیر، متابولیسم، سنتز پروتئین و اتوفاژی نقش دارد. ال–آرژنین با تحریک mTOR و بیان ژن های پیش‌التهابی در روده کوچک و در نتیجه تقسیم سلولی باعث رشد سریع‌تر و افزایش وزن بدن با یکنواختی می‌شود (Wang *et al.*, 2022). از طرف دیگر، ال–آرژنین با تقویت ترکیب میکروبی دستگاه گوارش، محیط را برای میکروارگانیسم‌های مفید مناسب‌تر کرده، اثراتی مشابه آنتی‌بیوتیک‌ها دارد و افزودن سطح ال–آرژنین توانست که مورفولوژی مخاط روده را بهبود بخشد و در بهبود قابلیت دسترسی به مواد مغذی نقش داشته باشد (Aguzey *et al.*, 2020). همچنین، آرژنین بیان ژن‌های پیش‌التهابی در روده کوچک را کاهش می‌دهد، غلظت پلی‌آمین‌ها را بهبود می‌بخشد و در نتیجه تقسیم سلولی، تولید پروتئین و رشد بافت را افزایش می‌دهد و تاثیر مثبت بر یکنواختی پرندگان دارد (Latour *et al.*, 2020). از سوی دیگر، به‌نظر می‌رسد که سولفات مس به‌عنوان یک آنتی‌بیوتیک و پرواکسیدان خاص عمل می‌کند و با افزایش تعداد، مساحت و اندازه سلول‌های جامی و ضخامت مخاط روده، جذب مواد مغذی را افزایش می‌دهد (Di Giancamillo *et al.*, 2018).

متغیرهای بلوغ یک ویژگی ژنتیکی و اقتصادی مهم برای پرورش طیور هستند و می‌توانند برای ایجاد استراتژی های اصلاح نژادی با اندازه‌گیری‌های ترکیب بدن به بهترین شکل ممکن برای دستیابی به حداکثر وزن بدن و بازده اقتصادی مورد استفاده قرار گیرند (Wolc *et al.*, 2014). گفته می‌شود که طول بدن و طول استخوان ساق پا ابزارهای بسیار مناسبی برای پیش بینی پتانسیل رشد مرغ‌های تخم‌گذار نسبت به وزن بدن هستند (Khanal, 2020). اندازه تاج (ارتفاع و طول) به سرعت تحت تأثیر ترکیب جیره قرار می‌گیرد و به‌نظر می‌رسد که غلظت استروژن پلاسما همزمان با رشد تاج افزایش می‌یابد. گزارش شد که وزن بدن، ارتفاع شانه، دور سینه، طول و طول کمر، طول ساق پا و طول ران با تغذیه جیره حاوی ۱۰۰۰ میلی‌گرم آرژنین افزایش یافت (Shoyomboa *et al.*, 2022). ال–آرژنین ترشح هورمون آزاد کننده گنادوتروپین (GnRH[6]) را از هیپوفیز قدامی تحریک می‌کند، که این هورمون از تولید تنظیم شده استروئیدهای غدد جنسی پشتیبانی می‌کند و رشد تاج را بهبود می بخشد. روحانی‌پور و همکاران (Rouhanipour *et al.*, 2025) همچنین بیان کردند که طول بدن، طول ساقه و طول منقار همراه با طول سر برتری پتانسیل تخم‌گذاری را در یک نژاد خاص از مرغ ایجاد می‌کند. آرژنین باعث تولید سوماتوتروپین و فاکتور رشد شبه انسولین می‌شود و سپس با القا میتوژنز منجر به رشد استخوان خواهد شد. علاوه بر این، اثرات آنابولیک مختلف در متابولیسم ماهیچه‌های اسکلتی، مانند تمایز و تکثیر سلول‌های ماهواره‌ای نیز با آرژنین، و تجمع پروتئین میوفیبریلار مرتبط هستند. ال–آرژنین با کاهش سطح اینترلوکین–۶، که یک سایتوکین موثر بر تحلیل استخوان است، و با افزایش تولید اکسید نیتریک و سنتز کلاژن نوع–۱ در استئوبلاست‌ها، عملکرد رشد فیزیکی را بهبود می‌بخشد (Kim, 2025). اوجو و همکاران (Ojo *et al.*, 2014) اشاره کردند که طول پا اندازه‌گیری بهتری نسبت به وزن بدن برای بررسی اثرات تغذیه‌ای و ژنتیکی است و بین طول پا و رشد اسکلتی و سطوح کلسیم، فسفر، پروتئین تام، آلبومین و کلسترول در پلاسمای مرغ‌های تخم‌گذار رابطه وجود دارد. در آزمایشی دئو و همکاران (Deo *et al.*, 2018) گزارش کردند که افزودن ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس به فرم سولفات در جیره جوجه‌های گوشتی از سلول‌ها در برابر آپوپتوز محافظت می‌کند و باعث افزایش وزن بدن و بهبود خصوصیات لاشه و کاهش ضریب تبدیل خوراک خواهد شد. احتمالاً مس از طریق فعالیت لیزیل اکسیداز، که اتصال متقابل کلاژن و تثبیت ماتریکس طبیعی خارج سلولی (ECM[7]) را تسهیل می‌کند، و تاثیر بر آنتی‌ژن هسته‌ای سلول (PCNA[8]) در استخوان‌های بلند طیور مانند استخوان ساق پا در متابولیسم استخوان نقش مهمی ایفا می‌کند (Rouhanipour *et al.*, 2025). مس با افزایش مسیر سیگنالینگ فاکتور رونویسی (Runx-2[9]) باعث بهبود ضخامت و طول استخوان‌های بدن (به‌ویژه استخوان ساق پا) و با بیان فاکتور رشد اندوتلیال عروقی و ایجاد هیپوکسی و تثبیت بیان ژن فاکتور ۱–آلفا القاشونده توسط هیپوکسی (HIF-1a[10]) می‌شود. از سوی دیگر، هیپوکسی تمایز استخوانی سلول‌های بنیادی مزانشیمی و همچنین رشد استخوان را در داخل بدن با تأثیر بر مسیر سیگنالینگ Runx-2 کنترل می‌کند (Li *et al.*, 2014). استفاده از سطوح بالاتر آرژنین در جیره‌های طیور باعث افزایش

[4] Mammalian target of rapamycin
[5] Insulin-like growth factor 1
[6] Gonadotropin-releasing hormone
[7] Extracellular Matrix
[8] Proliferating cell nuclear antigen
[9] Runt-related transcription factor-2
[10] Hypoxia-inducible factor 1-alpha

رهاسازی هورمون رشد فاکتور رشد شبه‌انسولین-۱ برای جلوگیری از قفس رنجوری، افزایش نرخ ساخت پروتئین و افزایش توده و حجم ماهیچه سینه و به‌عنوان پیش‌ساز پروتئین‌ها، پلی‌آمین‌ها، کراتین، اورنیتین و به‌عنوان پیش‌ساز مولکول‌های متابولیکی کلیدی مانند نیتریک اکسید و گلوتاتیون عمل می‌کند و می‌تواند مقادیر بیشتری از پرولین و هیدروکسی پرولین را تولید کند که برای سنتز بافت همبند عضلات مورد نیاز است و سبب بهبود متغیرهای فیزیکی بدن در امر بهبود شرایط بلوغ پرندگان خواهد شد (Willis *et al.,* 2017). از سوی دیگر، ال-آرژنین یک اسیدآمینه نیمه‌ضروری است که مانند عنصر مس برای فرآیندهای بیولوژیکی مختلف مانند رگ‌زایی مورد نیاز است (Noori *et al.,* 2022). به‌طور کلی، ترکیب مس و سطوح بالای ال-آرژنین می‌تواند اثرات استخوان‌زایی و ویژگی‌های فیزیکی بلوغ را برای ادامه تولید تخم‌مرغ افزایش دهد و روشی را برای پیشگیری و درمان پوکی استخوان و شکستگی استخوان در مرغ‌های تخم‌گذار ارائه دهد.

فاکتور تمایز رشد-۹ (GDF9[11]) یکی از ابرخانواده‌های تبدیل کننده فاکتور رشد-b است و نقش انحصاری در تولید ایفا می‌کند (Huang *et al.,* 2015). GDF9 در کنترل رشد فولیکولی تخمدان و تخمک‌گذاری مرغ اثر دارد، سلول‌های گرانولوزای سوماتیک و توانایی رشد تخمک را تغییر می‌دهد، نقش‌های فیزیولوژیکی فولیکولی را کنترل می‌کند و ممکن است دفع سلول‌های گرانولوزا را نیز کنترل کند (Lou *et al.,* 2018). به‌نظر می‌رسد که ال-آرژنین و سولفات مس با بیان ژن GDF9 می‌توانند فولیکول‌های تخمدان مرغ و صفات تخمک‌گذاری را بهبود بخشند و تولید تخمک را افزایش دهند (Alotaibi *et al.,* 2022). شاید یکی دیگر از دلایل افزایش تولید تخم مرغ با استفاده از آرژنین و سولفات مس، تاثیر غلظت پلاسمایی آنها در خون بر تولید هورمون لوتئیزه کننده (LH[12]) در مرغ‌های تخم‌گذار در حین تولید باشد. اسید آمینه ال-آرژنین احتمالاً با افزایش غلظت استرادیول پلاسما (با آزادسازی همزمان LH) در طول دوره قبل از تخم‌گذاری در مرغ‌ها اتفاق می‌افتد و سولفات مس با افزایش سطح پروژسترون پلاسما به طور مستقیم بر رشد تخمدان‌ها و فولیکول‌ها تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش در تولید تخم‌مرغ می‌شود. اکسید نیتریک اثر هم‌افزایی با پروژسترون دارد و بر ترشحات لوله رحمی تأثیرگذار است. اسیدآمینه آرژنین جزئی از هورمون وازوتوسین است که نقش مهمی را در انقباضات اولیه رحم در مرغ‌های تخم‌گذار دارد؛ بنابر این، در میزان تخم‌گذاری می‌تواند مؤثر باشد (Uyanga *et al.,* 2022). در مطالعه حاضر، افزایش مشاهده شده در تعداد کل تخم‌مرغ‌ها در میان پرندگانی که با جیره ال-آرژنین تغذیه شدند را می‌توان به نقش منحصر به فرد هضم و جذب آرژنین در ترویج استفاده از پروتئین جیره و تبدیل آن به پروتئین تخم مرغ نیز نسبت داد (Youssef *et al*., 2015). بر اساس تحقیقات قبلی، ژن‌های با بیان افتراقی (DEGs[13]) با نرخ بالای تولید تخم مرغ در محور هیپوتالاموس-هیپوفیز-تخمدان مرغ از طریق رونوشت مرتبط هستند و DEGهایی را شناسایی کردند که مسیر سیگنالینگ mTOR، مسیر سیگنالینگ سایتوکاینی بدل جانوس کیناز (فعال کننده رونویسی)، متابولیسم تریپتوفان و مسیرهای سیگنالینگ بازدارنده فسفواینوزیتید-۳-کیناز را در محور هیپوتالاموس-هیپوفیز-تخمدان در مرغ‌های تخم‌گذار تنظیم می‌کنند (Hao *et al*., 2021) و بیان پروتئین کیناز اس-۶ ریبوزومی سبب افزایش آزاد سازی فولیکول‌ها از تخمدان و افزایش تولید تخم‌مرغ می‌شود. بنابر این، این افزایش در تولید تخم‌مرغ می‌تواند به‌دلیل تاثیر ال-آرژنین در تنظیم مسیر سیگنالینگ mTOR باشد (Mishra *et al.,* 2020). طبق گفته سان و همکاران (Sun *et al.,* 2022)، سطح بهینه آرژنین در کل جیره ۰/۸۵ درصد برای رسید به سطح حداقلی تولید تخم‌مرغ و ۰/۸۶ درصد برای راندمان مناسب خوراک مصرفی کافی خواهد بود. با این‌حال، دئو و همکاران (Dao *et al.,* 2021) گزارش کردند که سطح ۰/۸۹ درصد آرژنین بر عملکرد تخم‌گذاری در مرغ‌های های‌لاین قهوه‌ای هنگامی‌که با جیره حاوی ۱۳ درصد پروتئین خام در مقایسه با جیره حاوی ۱۷ درصد پروتئین خام تغذیه شدند، تاثیر معنی‌داری نداشت. Pekel و Alp (۲۰۱۱) گزارش دادند که مکمل با ۲۵۰ پی‌پی‌ام سولفات مس باعث بهبود تولید و ویژگی‌های پوسته تخم‌مرغ شد، اما وزن تخم مرغ و مصرف خوراک را کاهش داد. یک توضیح احتمالی برای پاسخ‌های مختلف به مصرف خوراک در میان منابع مختلف مس ممکن است فراهمی زیستی متفاوت آنها و اثرات متفاوت آنها بر دستگاه گوارش باشد (Pang & Applegate, 2007). برای طیور، آرژنین یک اسیدآمینه ضروری به‌دلیل فقدان کربامویل فسفات سنتتاز است و فعالیت محدودی از آرژیناز کبدی و اورنیتین ترانس کاربامویلاز دارد (Fathima *et al.,* 2024). جیره‌های غذایی با سطح بالایی از آرژنین به طور مثبت بیان هورمون آزادکننده گنادوتروپین، اکسید نیتریک و IGF-1 را در مرغ‌های تخم‌گذار تحریک می‌کنند و در نهایت عملکرد تولید را بهبود می بخشند. IGF-1 باعث گشادشدن عروق، افزایش جریان خون و کاهش فشار خون می‌شود (Uyanga *et al*., 2022). ال-آرژنین و مس با تاثیر بر ژن‌های یدوتیرونین دیودیناز-۱، یدوتیرونین دیودیناز-۲، تیوردوکسین ردوکتاز-۱ و سلنوپروتئین-۱ در کبد و با تحریک غده تیروئید بر مصرف خوراک تأثیر می‌گذارند (Carvalho & Dupuy, 2017; Mariotti *et al.,* 2012).

کیفیت داخلی تخم‌مرغ همچنان موردتوجه صنعت طیور در سراسر جهان است (Rouhanipour *et al.,* 2022). در آزمایش حاضر، سولفات مس (۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ال-آرژنین (۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر از حد توصیه شده)، احتمالاً با بهبود تغییرات مورفولوژیکی در اپیتلیوم مجرای و غده‌ای مگنوم و ترشح β-اوموسین نسبت آلبومین ضخیم به آلبومین نازک را بهبود دادند و سبب بهبود واحد هاو شدند (Zhang *et al.,* 2022). کیروندا و مک‌کی (Kirunda & McKee, 2000) دریافتند که استحکام پوسته تخم‌مرغ به‌طور قابل توجهی با شکل تخم مرغ، شاخص زرده و واحد هاو همبستگی داشت.

[11] Growth differentiation factor-9
[12] Luteinizing hormone
[13] Identification of Differentially Expressed Genes

به‌نظر می‌رسد که افزایش سطح سولفات مس در مرغ‌ها از طریق بهبود ارتفاع لایه موثر، لایه پالیز و تراکم دستگیره‌های پستاندار (این لایه‌ها در سنتز کریستال‌های کلسیم در طول تشکیل پوسته نقش دارند) در بافت ایستموس بر استحکام پوسته تخم‌مرغ تأثیر می‌گذارد و از این طریق ساختار پوسته تخم مرغ را بهبود می‌بخشد (Qiu *et al*., 2020). در مطالعه‌ای گزارش شد که افزودن سطح ۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم اسیدآمینه ال-آرژنین به جیره مرغ‌های تخم‌گذار تأثیر معنی‌داری بر وزن تخم‌مرغ نداشت که ممکن است با عدم افزایش وزن سفیده تخم‌مرغ مرتبط باشد (Yang *et al.,* 2016). سان و همکاران (Sun *et al.,* 2022) ال-آرژنین را در سطح ۰/۰۵-۱/۰۰ درصد در جیره مرغ‌های تخم‌گذار اضافه کردند و گزارش کردند که درصد تولید، رنگ زرده، درصد سفیده و زرده با سطح ۱/۰۰ درصد افزایش یافته بود. همچنین، تأمین کلسیم و توجه به تعادل آنیون-کاتیون در جیره بر کیفیت پوسته تأثیر دارد، در حالی که افزایش سطوح ال-آرژنین تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های پوسته نداشت (Kazemifard *et al.,* 2017). همچنین، دائو و همکاران (Dao *et al.,* 2021) گزارش کردند که افزایش سطح ال-آرژنین از ۱/۳۵ درصد به ۱/۴۶درصد باعث افزایش وزن تخم مرغ و واحد هاو شد ولی میزان ضخامت پوسته تخم‌مرغ را کاهش داد. الشریف و همکاران (Elsherif *et al.,* 2020) گزارش کردند که افزودن سطوح ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس به جیره مرغ‌های تخم‌گذار هایسکس قهوه‌ای سبب افزایش وزن و توده تخم‌مرغ، واحد هاو و ضخامت پوسته تخم‌مرغ شد. شارما و همکاران (Sharma *et al.,* 2025) پیشنهاد کردند که عنصر مس می‌تواند با تأثیر بر تشکیل کریستال کلسیت و اصلاح ساختار لووگرافی کریستالی پوسته تخم مرغ بر خواص پوسته تخم مرغ تأثیر بگذارد. لیزیل اکسیداز یک کوپرآنزیم است که شامل انتقال لیزین به دزموزین و ایزودزموزین است. بنابر این، مقادیر کافی مس منجر به تشکیل طبیعی پوسته و شاخص شکل تخم مرغ می‌شوند (Dong *et al.,* 2022). ژانگ و همکاران (Zhang *et al.,* 2015) گزارش کردند که برخی از ژن‌های پرندگان می‌توانند فرآیند کانی‌سازی یا پیش‌سازهای پوسته تخم‌مرغ را فراهم و تنظیم کنند و فاکتورهای فیزیکی کیفیت تخم مرغ مانند ویژگی آلبومین تخم‌مرغ و ضخامت پوسته، شکل تخم‌مرغ توسط بیان به‌ترتیب ژن اووسیلیدن-۱۱۶ به‌طور مشترک با ژن اووسیلیدن-۳۲ در ایستموس و رحم تعیین می‌شوند. طبق گزارشات منتشرشده، مس و ال-آرژنین با بیان منظم ژن اووسیلیدن-۱۱۶، ژن اووسیلیدن-۳۲ و ژن پلی‌مورفیسم تک‌نوکلئوتیدی سبب ترشح β-اوموسین و انتقال کلسیم به غدد پوسته‌ساز رحم و تحریک آنزیم کربینک آنهیدراز جهت شکل‌گیری پوسته تخم‌مرغ خواهند شد و احتمالا از این طریق باعث کاهش تولید تخم‌های شکسته، بهبود ضخامت پوسته و شاخص شکل در تخم‌مرغ می‌شوند (Green *et al.,* 2022; Hincke *et al.,* 2012; Yang *et al.,* 2016).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، افزایش سطح مس از طریق منبع سولفات مس در جیره و افزودن سطوح بالای ال-آرژنین ممکن است برای بازسازی استخوان مرغ‌های تخم‌گذار بسیار موثر باشند و می‌توانند اثرات استخوان‌زایی و صفات فیزیکی بلوغ را افزایش دهند و در عین حال سلامت فیزیکی اندام ها را بهبود بخشند و روشی را برای پیشگیری و درمان پوکی استخوان و شکستگی‌های استخوان مرغ‌های تخم‌گذار در مرحله حساس پرورش با استفاده از مواد معدنی و اسیدهای آمینه که به عنوان بلوک‌های سازنده پروتئین هستند ارائه دهند. از طرف دیگر، افزایش سطح مس از طریق منبع سولفات مس در جیره و بهبود دسترسی آن‌ها در اثر مصرف سطوح بالاتر ال-آرژنین، میزان تخمک‌گذاری را افزایش داد. به طور کلی، اثر افزودن ۸ و ۱۶ میلی‌گرم مس بر کیلوگرم همراه با ۴۰ درصد بالاتر ال-آرژنین به جیره مرحله تولید مرغ‌های تخم‌گذار اثرات مثبتی بر متغیرهای عملکردی شاخص‌های کیفی تخم مرغ دارد و می‌تواند شاخص‌های بلوغ فیزیولوژیکی در این محدوده سنی را بهبود دهد. انجام مطالعات بیشتر در این زمینه توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به‌خاطر حمایت مالی و تجهیزات آزمایشگاهی و از آقایان حمید سلیمانی و دکتر سروش خادمیان (زنجیره پگاه جهان‌نما گلستان)، دکتر رضا مبصری (زنجیره ماهان سبز گلستان)، دکتر امیر عطار (شرکت خوراک‌پرداز هزاره‌نوین مشهد)، دکتر امیر حمزه دریایی (دامپزشک شرکت مرغ پر طلای گلستان)، رضا شهمرادی رئیس هیئت مدیره و مدیر عامل و بهزاد شریفی عضو هیئت مدیره شرکت شهرک‌های صنعتی استان گلستان برای کمک‌های ارزشمند آن‌ها در تهیه مواد تشکیل دهنده خوراک و سولفات مس ال-آرژنین برای اجرای این طرح تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Abdulrazzaq, A. H., Alrawi, S. T. J., & Alkubaisi, A. B. (2019). The effect of different concentrations of copper sulfate on the some physiological and immunological parameters of local male rabbits. *Drug Invention Today*, 12(11), 26-54.

Aguzey, H. A., Gao, Z., Haohao, W., Guilan, C., Zhengmin, W., Junhong, C., & Li, N. Z. (2020). The role of arginine in disease prevenTion, guT microbioTa modulaTion, growTh performance and The immune sysTem of broiler chicken–a review. *Annals of Animal Science*, 20(2), 325-341. https://doi.org/10.2478/aoas-2019-0081

Akbari Moghaddam Kakhki, R., Golian, A., & Zarghi, H. (2016). Effect of digestible methionine+cystine concentration on performance, egg quality and blood metabolites in laying hens. *British Poultry Science*, 57(3), 403-414. https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1173199

Alotaibi, M. M., Alhimaidi, A. R., Al-Ghadi, M. Q., Ammari, A. A., & Al-Malahi, N. M. (2022). Evaluation of the maturity and gene expression of sheep oocytes and embryos cultured in media supplemented with marjoram (*Origanum vulgare*) extract. *Genes*, 13(10), 1844. https://doi.org/10.3390/genes13101844

Ansari Pirsaraei, Z., Hatefi, A., Zare Shahneh, A., & Deldar, H. (2022). Evaluation of Beta-Adrenergic Agonist Theophylline Function in Reducing Inflammation on Blood Metabolites and Egg Quality Traits in Laying Hens at the end of Production Period. *Research on Animal Production*, 13(37), 114-121. http://dx.doi.org/10.52547/rap.13.37.114 [In Persian]

Bahry, M. A., Hanlon, C., Ziezold, C. J., Schaus, S., & Bédécarrats, G. Y. (2023). Impact of growth trajectory on sexual maturation in layer chickens. *Frontiers in Physiology*, 14, 1174238. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1174238

Bello, A., Frei, S., Peters, M., Balkema-Buschmann, A., Baumgärtner, W., & Wohlsein, P. (2017). Spontaneous diseases in captive ratites (Struthioniformes) in northwestern Germany: A retrospective study. *PloS One*, 12(4), 173-873. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173873

Carvalho, D. P., & Dupuy, C. (2017). Thyroid hormone biosynthesis and release. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 458, 6-15. https://doi.org/10.1016/j.mce.2017.01.038

Cui, Y. C. Y., Wang Jing, W. J., Zhang HaiJun, Z. H., Feng Jia, F. J., Wu ShuGeng, W. S., & Qi GuangHai, Q. G. (2019). Effect of photoperiod on ovarian morphology, reproductive hormone secretion, and hormone receptor mRNA expression in layer ducks during the pullet phase. *Poultry Science*, 98(6), 2439-2447 https://doi.org/10.3382/ps/pey601

Deo, C., Mandal, A. B., & Tyagi, P. K. (2018). Response of supplementary sources and levels of copper in diet on the performance of broiler chickens. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 18(1), 89-96.

Dao, H. T., Sharma, N. K., Bradbury, E. J., & Swick, R. A. (2021). Response of laying hens to l-arginine, l-citrulline and guanidinoacetic acid supplementation in reduced protein diet. *Animal Nutrition*, 7(2), 460-471. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.09.004

De Lima, M. B., de Sousa, M. G. B. L., Minussi, A. R. T., de Carvalho, L. C., Veras, A. G., Malheiros, E. B., & da Silva, E. P. (2022). Arginine requirement for egg production in Japanese quail. *Poultry Science*, 101(6), 101841. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101841

Di Giancamillo, A., Rossi, R., Martino, P. A., Aidos, L., Maghin, F., Domeneghini, C., & Corino, C. (2018). Copper sulphate forms in piglet diets: Microbiota, intestinal morphology and enteric nervous system glial cells. *Animal Science Journal*, 89(3), 616-624. https://doi.org/10.1111/asj.12948

Dollwet, H. H. A., & Sorenson, J. R. J. (1988). Roles of copper in bone maintenance and healing. *Biological Trace Element Research,* 18, 39-48. https://doi.org/10.1007/bf02917487

Dong, Y., Zhang, K., Han, M., Miao, Z., Liu, C., & Li, J. (2022). Low level of dietary organic trace minerals improved egg quality and modulated the status of eggshell gland and intestinal microflora of laying hens during the late production stage. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 920418. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.920418

Elsherif, H., Fouad, A., Nassar, S., Wahba, F., Elsabagh, M., & El-Iraqi, K. (2019). Effect of dietary copper sulphate on laying hen performance, egg quality, and oxidative stress in hot climate conditions. *European Poultry Science/Archiv für Geflügelkunde*, 83, 275. https://doi.org/10.1399/eps.2019.275

Fathima, S., Al Hakeem, W. G., Shanmugasundaram, R., Periyannan, V., Varadhan, R., & Selvaraj, R. K. (2024). Effect of 125% and 135% arginine on the growth performance, intestinal health, and immune responses of broilers during necrotic enteritis challenge. *Poultry Science*, 103(7), 103826. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103826

Green, L., Coronado-Zamora, M., Radío, S., Rech, G. E., Salces-Ortiz, J., & González, J. (2022). The genomic basis of copper tolerance in Drosophila is shaped by a complex interplay of regulatory and environmental factors. *BMC Biology*, 20(1), 275. https://doi.org/10.1186/s12915-022-01479-w

Godswill, A. G., Somtochukwu, I. V., Ikechukwu, A. O., & Kate, E. C. (2020). Health benefits of micronutrients (vitamins and minerals) and their associated deficiency diseases: A systematic review. *International Journal of Food Sciences*, 3(1), 1-32. http://dx.doi.org/10.47604/ijf.1024

Hao, E. Y., Wang, D. H., Chen, Y. F., Zhou, R. Y., Chen, H., & Huang, R. L. (2021). The relationship between the mTOR signaling pathway and ovarian aging in peak-phase and late-phase laying hens. *Poultry Science*, 100(1), 334-347. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.005

Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience*, 17(1), 1266-1280. https://doi.org/10.2741/3985

Huang, H. Y., Liang, Z., Li, S. F., Li, C. M., Zhao, Z. H., & Wang, Q. B. (2015). Polymorphism identification in BMP15 and GDF9 genes and their association with egg production in chickens. *British Poultry Science*, 56(3), 277-283. https://doi.org/10.1080/00071668.2015.1019829

Ibrahim, M. S., Salem, A., EL-Wardany, I., EL-Dien, N., Hassan, A., & Mohamed, A. E. R. Y. (2024). Productive and physiological traits of inshas laying hens as affected by some additives in the diet. *Journal of Environmental Science*, 53(2), 539-558. https://doi.org/10.21608/jes.2024.222502.1574

Kazemi-fard, M., Yousefi, S., Rezaei, M., Shohre, B., & Saberifar, T. (2017). Effect of L-Argenine on productive performance, eggquality parameters, blood and hormone parameters of laying hens in late-

phase of production. *Research on Animal Production*, 8, 11-17. https://doi.org/10.29252/rap.9.20.27 [In Persian]
Kirunda, D. F. K., & McKee, S. R. (2000). Relating quality characteristics of aged eggs and fresh eggs to vitelline membrane strength as determined by a texture analyzer. *Poultry Science*, 79(8), 1189-1193. https://doi.org/10.1093/ps/79.8.1189
Kim, S. G. (2025). Nonessential amino acid is not nonessential in geriatric patients: implications for maxillofacial wound healing and bone repair. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, 47(1), 1-20. https://doi.org/10.1186/s40902-025-00465-w
Khanal, T. (2020). Rearing Mineral Nutrition and Housing Cage Type: Impact on Bone Quality in Pullets and Hens (Doctoral dissertation, University of Guelph).
Latour, Y. L., Gobert, A. P., & Wilson, K. T. (2020). The role of polyamines in the regulation of macrophage polarization and function. *Amino Acids*, 52(2), 151-160. https://doi.org/10.1007/s00726-019-02719-0
Li, S., Wang, M., Chen, X., Li, S. F., Li-Ling, J., & Xie, H. Q. (2014). Inhibition of osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells by copper supplementation. *Cell Proliferation*, 47(1), 81-90. https://doi.org/10.1111/cpr.12083
Lou, Q., Li, T., Wu, P., Qiu, C., Zhang, G., & Wang, J. (2019). Polymorphism identification in GDF9 gene and its association analysis with reproduction traits in Jinghai Yellow chicken. *Animal Biotechnology*, 30(4), 332-341. https://doi.org/10.1080/10495398.2018.1516222
Mariotti, M., Ridge, P. G., Zhang, Y., Lobanov, A. V., Pringle, T. H., Guigo, R., & Gladyshev, V. N. (2012). Composition and evolution of the vertebrate and mammalian selenoproteomes. *PloS One*, 7(3), 33066. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033066
Milisits, G., Szász, S., Donkó, T., Budai, Z., Almási, A., Pőcze, O., & Sütő, Z. (2021). Comparison of changes in the plumage and body condition, egg production, and mortality of different non-beak-trimmed pure line laying hens during the egg-laying period. *Animals*, 11(2), 500. https://doi.org/10.3390/ani11020500
Mishra, S. K., Chen, B., Zhu, Q., Xu, Z., Ning, C., Yin, H., & Li, D. (2020). Transcriptome analysis reveals differentially expressed genes associated with high rates of egg production in chicken hypothalamic-pituitary-ovarian axis. *Scientific Reports*, 10(1), 5976. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62886-z
Mroczek-Sosnowska, N., Łukasiewicz, M., Wnuk, A., Sawosz, E., Niemiec, J., Skot, A., Jaworski, S., & Chwalibog, A. (2016). In ovo administration of copper nanoparticles and copper sulfate positively influences chicken performance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(9), 3058-3062. https://doi.org/10.1002/jsfa.7477
Noori, A., Hoseinpour, M., Kolivand, S., Lotfibakhshaiesh, N., Azami, M., Ai, J., & Ebrahimi-Barough, S. (2022). Synergy effects of copper and L-arginine on osteogenic, angiogenic, and antibacterial activities. *Tissue and Cell*, 77, 101849. https://doi.org/10.1016/j.tice.2022.101849
Ojo, V., Fayeye, T. R., Ayorinde, K. L., & Olojede, H. (2014). Relationship between Body Weight and Linear Body Measurements in Japanese Quail (Coturnix coturnix japonica). *Journal of Scientific Research*, 6(1). http://dx.doi.org/10.3329/jsr.v6i1.16368
Qiu, J. L., Zhou, Q., Zhu, J. M., Lu, X. T., Liu, B., Yu, D. Y., & Xu, J. M. (2020). Organic trace minerals improve eggshell quality by improving the eggshell ultrastructure of laying hens during the late laying period. *Poultry Science*, 99(3), 1483-1490. https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.006
Pang, Y., & Applegate, T. J. (2007). Effects of dietary copper supplementation and copper source on digesta pH, calcium, zinc, and copper complex size in the gastrointestinal tract of the broiler chicken. *Poult Sci*, 86, 531-537. https://doi.org/10.1093/ps/86.3.531
Paul, B. N., Chanda, S., Das, S., Singh, P., Pandey, B. K., & Giri, S. S. (2014). Mineral assay in atomic absorption spectroscopy. *The Beats of Natural Sciences*, 4(1), 1-17. [Google Scholar]
Pekel, A. Y., & M. Alp. (2011). Effects of different dietary copper sources on laying hen performance and egg yolk cholesterol. *J Appli Poult Res*, 20, 506-513. https://doi.org/10.3382/japr.2010-00313
Rouhanipour, H., Sharifi, D., & Irajian, G. H. (2021). The effect of L-carnitine and omega-3 fatty acids in the diet on morphology of liver, intestine and oviduct of laying hens. *Research on Animal Production*, 12(31), 31-42. http://dx.doi.org/10.52547/rap.12.31.31 [In Persian]
Rouhanipour, H., Ashayerizadeh, O., Sharifi, S. D., & Dastar, B. (2025). Dietary copper and L-arginine: influence on pullet maturation and productivity. *Journal of Applied Poultry Research*, 34(2), 100510. https://doi.org/10.1016/j.japr.2024.100510
Santos, M. J., Ludke, M. C., Silva, L. M., Rabello, C. B., Barros, M. R., Costa, F. S., & Wanderley, J. S. (2024). Complexed amino acid minerals vs. bis-glycinate chelated minerals: Impact on the performance of old laying hens. *Animal Nutrition*, 16, 395-408. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.11.006
Saini, H. S., & Wratten, N. (1987). Quantitative determination of total glucosinolates in rapeseed and meal digests. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 70(1), 141-145. https://doi.org/10.1093/jaoac/70.1.141
Scott, A., Vadalasetty, K. P., Łukasiewicz, M., Jaworski, S., Wierzbicki, M., Chwalibog, A., & Sawosz, E. (2018). Effect of different levels of copper nanoparticles and copper sulphate on performance,

metabolism and blood biochemical profiles in broiler chicken. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102(1), e364-e373. https://doi.org/10.1111/jpn.12754

Sharma, P., Ganguly, M., & Doi, A. (2025). Application of the synergism between eggshells and copper in nanotechnology. *Nanoscale Advances*, 30(1), 400. https://doi.org/10.1039/d5na00400d

Shokrani, F., Daneshyar, M., Ansari Pirsaraei, Z., & Mirghelenj, S. A. (2024). Effects of In ovo Injection of L-carnitine and Betaine on Hatchability, Blood Metabolites Concentration, Carcass Characteristics, Expression of Some Growth Associated Genes and Development of One Day Old Chicks. *Research on Animal Production*, 15(1), 83-94. https://doi.org/10.61186/rap.15.43.75 [In Persian]

Shoyomboa, A. J., Okona, E. M., Mosesa, A. A., Popoolab, M. A., & Jubrilc, A. E. (2022). The Effects of L-Arginine Supplement on the Growth Rate and Morphometric Performance of Three Indigenous Strains of Birds. *International Journal of Research Publications*, 101(1), 8-8.

Sun, M., Ma, N., Liu, H., Liu, Y., Zhou, Y., Zhao, J., & Lin, H. (2022). The optimal dietary arginine level of laying hens fed with low-protein diets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1), 63. https://doi.org/10.1186/s40104-022-00719-x

Sweeney, K. M., Aranibar, C. D., Kim, W. K., Williams, S. M., Avila, L. P., Starkey, J. D., ... & Wilson, J. L. (2022). Impact of every-day versus skip-a-day feeding of broiler breeder pullets during rearing on body weight uniformity and reproductive performance. *Poultry Science*, 101(8), 101959. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101959

Uyanga, V. A., Xin, Q., Sun, M., Zhao, J., Wang, X., Jiao, H., & Lin, H. (2022). Research Note: Effects of dietary L-arginine on the production performance and gene expression of reproductive hormones in laying hens fed low crude protein diets. *Poultry Science*, 101(5), 101816. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101816

Wang, R., Li, K., Sun, L., Jiao, H., Zhou, Y., Li, H., & Lin, H. (2022). L-Arginine/nitric oxide regulates skeletal muscle development via muscle fibre-specific nitric oxide/mTOR pathway in chickens. *Animal Nutrition*, 10, 68-85. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.04.010

Willis, V. C., Banda, N. K., Cordova, K. N., Chandra, P. E., Robinson, W. H., Cooper, D. C., & Holers, V. M. (2017). Protein arginine deiminase 4 inhibition is sufficient for the amelioration of collagen-induced arthritis. *Clinical & Experimental Immunology*, 188(2), 263-274. https://doi.org/10.1111/cei.12932

Wolc, A. (2014). Understanding genomic selection in poultry breeding. *World's Poultry Science Journal*, 70(2), 309-314. https://doi.org/10.1017/S0043933914000324

Yang, H., Ju, X., Wang, Z., Yang, Z., Lu, J., & Wang, W. (2016). Effects of arginine supplementation on organ development, egg quality, serum biochemical parameters, and immune status of laying hens. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, 18(1), 181-186. http://dx.doi.org/10.1590/1516-635x1801181-186

Yuan, C., Bu, X. C., Yan, H. X., Lu, J. J., & Zou, X. T. (2016). Dietary L-arginine levels affect the liver protein turnover and alter the expression of genes related to protein synthesis and proteolysis of laying hens. *Poultry Science*, 95(2), 261-267. https://doi.org/10.3382/ps/pev314

Youssef, S. F., Shaban, S. A. M., & Inas, I. I. (2015). Effect of l-arginine supplementation on productive, reproductive performance, immune response and gene expression in two local chicken strains: 1-egg production, reproduction performance and immune response. *Egyptian Poultry Science Journal*, 35, 573-590.

Zhang, Q., Zhu, F., Liu, L., Zheng, C. W., Wang, D. H., Hou, Z. C., & Ning, Z. H. (2015). Integrating transcriptome and genome re-sequencing data to identify key genes and mutations affecting chicken eggshell qualities. *PLoS One*, 10(5), 0125890. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125890

Zhang, T., Bai, S., Ding, X., Zeng, Q., Zhang, K., Lv, L., & Wang, J. (2022). Dietary theabrownin supplementation improves production performance and egg quality by promoting intestinal health and antioxidant capacity in laying hens. *Animals*, 12(20), 2856. https://doi.org/10.3390/ani12202856

Zhu, C., Lv, H., Chen, Z., Wang, L., Wu, X., Chen, Z., & Jiang, Z. (2017). Dietary zinc oxide modulates antioxidant capacity, small intestine development, and jejunal gene expression in weaned piglets. *Biological Trace Element Research*, 175, 331-338.https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-016-0767-3