

Research Article

Vol. 17, No.4, 2026, p. 447-461



Effects of Adding the Microalgae *Spirulina platensis* to Diets Containing Flaxseed oil on Performance, Antioxidant Status, and Blood Lipid Parameters of Aged Laying Hens

Javad Ghanouni Bostanabad¹, Sayed Ali Mirghelenj^{1*}, Mohsen Daneshyar¹, Ali Hashemi¹, Sina Payvastegan¹, Amir Mosayyeb Zadeh¹

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

*Corresponding Author's Email: a_mirghelenj@yahoo.com

How to cite this article:

Ghanouni Bostanabad, J., Mirghelenj, S. A., Daneshyar, M., Hashemi, A., Payvastegan, S., & Mosayyeb Zadeh, A. (2026). Effects of adding the microalgae *Spirulina platensis* to diets containing flaxseed oil on performance, antioxidant status, and blood lipid parameters of aged laying hens. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 17(4), 447-461. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/IJASR.2025.93378.1247>

Received: 09-05-2025

Revised: 03-10-2025

Accepted: 12-10-2025

Available Online: 03-02-2026

Introduction: Flaxseed oil contains a variety of unsaturated fatty acids such as linolenic acid, linoleic acid, and oleic acid. The linolenic acid content can be up to 53%, which leads to increased nutritional value. However, the oxidative sensitivity of these polyunsaturated fatty acids is a major concern. Diets supplemented with polyunsaturated fatty acids have been shown to increase cellular oxidative damage. Therefore, the use of antioxidants in diets containing flaxseed oil seems to be crucial. *Spirulina platensis* is rich in bioactive compounds that provide various health benefits. Phycocyanin, a pigment-protein complex found in spirulina, has strong antioxidant properties that help neutralize free radicals, thereby protecting cells from oxidative damage. The present study was conducted to investigate the effect of Spirulina algae supplementation in diets containing different levels of flaxseed oil on performance, blood and liver antioxidant parameters, and serum and egg yolk lipid parameters in laying hens.

Materials and Methods: For this purpose, 288 laying hens (Hy-line-W36, 70 weeks of age) were used in a 2 × 3 factorial design with 6 replications and 8 birds per replication. The experimental treatments included diets containing 3 levels of flaxseed oil (0, 1.5, and 3% of the diet) and 2 levels of *Spirulina platensis* microalgae (0 and 5 g/kg of the diet). To evaluate performance indices, eggs were collected twice a day and the number and total weight of eggs were recorded at the end of each day. Egg mass, feed intake and feed conversion ratio were calculated weekly. To evaluate blood parameters, two serum samples from each replicate (12 samples per treatment) were prepared at the end of the experimental period. All data from this experiment were statistically analyzed in a 2×3 factorial test using SAS software and the Mixed procedure.

Results and Discussion: The results showed that hens treated with 3% flaxseed oil with or without spirulina had the highest percentage of egg production, weight and mass, which were significantly higher than those treated without flaxseed oil. The use of 3% flaxseed oil with 5 g of spirulina reduced feed conversion ratio compared to other experimental treatments. Levels of 1.5 and 3% flaxseed oil with 5 g of spirulina significantly reduced



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.2025.93378.1247>

triglyceride and VLDL concentrations. The main effects of flaxseed oil showed that 3% flaxseed oil reduced egg yolk cholesterol. The interaction effect of 5 grams of spirulina and 3% flaxseed oil reduced egg yolk triglyceride levels compared to the control treatment. Diets containing 1.5 and 3% flaxseed oil reduced total antioxidant capacity and liver superoxide dismutase and total serum antioxidant capacity, while the use of 5 g of spirulina increased the aforementioned parameters. Also, serum malondialdehyde levels increased in chickens fed diets containing 1.5 and 3% flaxseed oil without Spirulina, and the addition of Spirulina was able to compensate for this increase caused by flaxseed oil. Laying hens have a very strong body fat metabolism, especially during the peak egg production period.

Oils, as one of the essential nutrients for animal growth and one of the main components of egg yolk, play an important role in regulating the production performance of laying hens and egg weight. Therefore, the production performance and egg weight of laying hens may be improved by supplementing the diet with various oils. The reduction in yolk lipid profile in the present study could be due to the reduction of triglycerides in the blood circulation of the birds due to the increased omega-3 intake in the flaxseed oil-containing diet, potentially limiting the availability of lipids for yolk formation. Spirulina contains γ -linoleic acid, which binds to cholesterol metabolites in bile and prevents their accumulation. The researchers also stated that the reduction in cholesterol levels may be related to the inhibitory effects of spirulina on the activity of HMG-CoA reductase, an allosteric enzyme required for cholesterol synthesis in the liver. The present results showed that the increase in hepatic malondialdehyde, which is an indicator of oxidative stress, was reduced again by the addition of Spirulina to the flaxseed oil-containing diets, while glutathione peroxidase activity and total antioxidant capacity were increased by Spirulina treatment. The capacity of Spirulina to restore redox balance in flaxseed oil-containing diets can be attributed to its bioactive antioxidant compounds such as flavonoids and polyphenols and other free radical antagonists such as α -tocopherol, ascorbic acid, β -carotene and selenium.

Conclusion: In general, the present researchers recommend using 3% flaxseed oil in the diet of laying hens to benefit from the positive effects of flaxseed oil on performance and blood lipid parameters. However, based on the present results, if 1.5 or 3% flaxseed oil is added to the diet, the use of *Spirulina platensis* algae as a natural antioxidant is vital to prevent lipid peroxidation.

Keywords: Cholesterol, Egg yolk, Fatty acids, Malondialdehyde, Omega-3

اثرات افزودن ریزجلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس به جیره‌های حاوی روغن کتان بر عملکرد، وضعیت آنتی‌اکسیدانی و فراسنجه‌های لیپیدی خون مرغ‌های تخم‌گذار مسن

جواد قانونی بستان کار^۱، سیدعلی میرقلنج^{۲*}، محسن دانشیار^۱، علی هاشمی^۱، سینا پیوستگان^۱، امیر مصیب زاده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر مکمل سازی جلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره‌های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر ویژگی‌های عملکردی و اقتصادی، شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی خون و کبد و فراسنجه‌های لیپیدی سرم خون و زرده تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار انجام شد. تعداد ۲۸۸ قطعه مرغ تخم‌گذار (Hy-line W-36 در سن ۷۰ هفتگی) در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل 2×3 ، با شش تکرار و هشت قطعه پرنده در هر تکرار استفاده گردید. عوامل مورد بررسی شامل سطوح مختلف روغن کتان (صفر، ۱/۵ و ۳ درصد جیره) و سطوح مختلف ریزجلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس (صفر و پنج گرم در کیلوگرم جیره) بودند. نتایج نشان دادند که مرغ‌های تغذیه شده با تیمارهای حاوی سه درصد روغن کتان یا بدون اسپیرولینا پلاتنسیس بیشترین درصد تولید، وزن و توده تخم‌مرغ را داشتند که به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد بیشتر بود. استفاده از سطوح ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان همراه با پنج گرم در کیلوگرم جلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره، غلظت تری-گلیسرید و VLDL سرم خون را به‌طور معنی‌داری کاهش دادند. اثر متقابل مصرف پنج گرم در کیلوگرم اسپیرولینا پلاتنسیس و سه درصد روغن کتان باعث کاهش میزان تری‌گلیسرید زرده تخم‌مرغ در مقایسه با شاهد شد. اثرات متقابل روغن کتان و اسپیرولینا پلاتنسیس نشان داد که استفاده از جیره‌های حاوی ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان باعث کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و سوپراکسید دیسموتاز کبد و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل سرم خون شدند و باین‌حال پنج گرم در کیلوگرم اسپیرولینا در این جیره‌ها شاخص‌های مذکور را افزایش داد. به‌طور کلی، استفاده از سه درصد روغن کتان به‌همراه پنج گرم در کیلوگرم جلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس در ترکیب جیره مرغ‌های تخم‌گذار علی‌رغم افزایش هزینه تولید یک کیلوگرم تخم‌مرغ تولیدی منجر به بهبود شاخص‌های عملکردی درصد تولید، وزن و توده تخم‌مرغ تولیدی، کاهش فراسنجه‌های لیپیدی سرم و بهبود شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی کبد و سرم خون پرندگان گردید.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای چرب، امگا-۳، زرده تخم‌مرغ، کلسترول، مالون‌دی‌آلدئید

مقدمه

عملکرد تولید را بهبود بخشید و ارزش غذایی خوراک را به‌میزان قابل توجهی افزایش داد (Gao et al., 2021). باین‌حال، حساسیت اکسیداتیو این اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه یکی از نگرانی‌های اصلی است (Islam et al., 2023). نشان داده شده است که مکمل نمودن جیره‌های غذایی با اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه، آسیب اکسیداتیو سلولی را افزایش می‌دهند (Djousse et al., 2011). در طول اکسیداسیون، تخریب اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه رخ می‌دهد که منجر به ایجاد ترکیبات بالقوه سمی می‌شود (Christie & Harwood, 2020). همچنین اکسیداسیون باعث تولید مولکول‌های نایم از جمله مالون‌دی‌آلدئید می‌شود که به مولکول‌های زیستی آسیب می‌رسانند (Wang et al., 2020). از آنجایی که آلفا-لینولنیک اسید نسبت به اکسیداسیون بسیار حساس است، بنابراین افزودن روغن کتان به جیره ممکن است که منجر به پراکسیداسیون لیپیدی

کتان، گیاه علفی یک‌ساله و دارای دانه‌هایی است که حاوی مقدار زیادی روغن می‌باشند. این روغن از دانه‌های کتان از طریق پرس سرد در دمای پایین برای تولید روغن خام به دست می‌آید و سپس تصفیه می‌شود (Rodriguez-Estrada et al., 2017). بذر کتان یکی از ۱۰ محصول برتر روغنی در سراسر جهان محسوب می‌شود و روغن بذر کتان حاوی انواع اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسیدلینولنیک، اسیددیلینولیک و اسیداولنیک است. مقدار اسیدلینولنیک می‌تواند تا ۵۳ درصد باشد که منجر به افزایش ارزش غذایی می‌شود. نشان داده شده است که افزودن روغن بذر کتان به خوراک طیور،

۱- گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: a_mirghelenj@yahoo.com.
<https://doi.org/10.22067/IJASR.2025.93378.1247>

هدف بررسی اثر مکمل سازی جلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس در جیره های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر عملکرد، شاخص های آنتی-اکسیدانی خون و کبد و فراسنجه های لیپیدی سرم خون و زرده تخم-مرغ در مرغ های تخم گذار انجام گردید.

مواد و روش ها

در این تحقیق، از تعداد ۲۸۸ قطعه مرغ تخم گذار (سویه های لاین W-۳۶ در سن ۷۰ هفتگی) استفاده شد. پرندگان با وزن بدن مشابه (1530 ± 50 گرم) انتخاب و در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل 2×3 به شش تکرار و هشت قطعه پرند در هر تکرار اختصاص داده شدند. پرندگان به منظور سازگاری با شرایط آزمایش، ابتدا به مدت دو هفته با جیره پایه و سپس به مدت هشت هفته (۵۶ روز) با تیمارهای آزمایشی تغذیه گردید. تیمارهای آزمایشی شامل جیره های حاوی سه سطح روغن کتان (صفر، ۱/۵ و ۳ درصد جیره) و دو سطح ریزجلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس (صفر و ۵ گرم در کیلوگرم جیره) بودند که مطابق با توصیه های تغذیه ای سویه های -لاین W36 در سال ۲۰۲۰ تنظیم گردید (جدول ۱). /اسپیروولینا به میزان پنج گرم کیلوگرم جیره به صورت سرک و جدا از جیره پایه به پرندگان داده شد. جیره پایه بدون لحاظ کردن مواد مغذی /اسپیروولینا به طور کامل بالانس شده بود و بدین ترتیب اثرات /اسپیروولینا مستقل از ترکیب جیره اصلی قابل ارزیابی بود. برنامه نوری شامل ۱۶ ساعت روشنایی با شدت ۳۰ لوکس و هشت ساعت تاریکی بود. در طول مدت زمان انجام آزمایش، دما و رطوبت نسبی سالن به ترتیب در دامنه ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد و ۴۰ تا ۵۰ درصد حفظ شدند.

پودر ریزجلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس مورد استفاده در این آزمایش از شرکت جلبک پارس شیراز تهیه شد. مقادیر ماده خشک، خاکستر (با استفاده از کوره)، پروتئین خام (با استفاده از کج‌دال)، چربی خام (با استفاده از سوکسله) و انرژی خام با استفاده از بمب کالری متر (Parr 6200 bomb calorimeter, Parr Instruments Co., Moline, IL) در آزمایشگاه تغذیه گروه علوم دامی دانشگاه و مقادیر انرژی قابل متابولیسم، کلسیم و فسفر در مرکز تحقیقات کرج اندازه گیری شد. پروفیل برخی از اسیدهای آمینه ضروری توسط خود شرکت با استفاده از HPLC استخراج گردید. مقادیر ماده خشک ۸۸ درصد، خاکستر نه درصد، پروتئین خام ۵۵ درصد و چربی خام ۴/۵ درصد به دست آمد. مقادیر انرژی خام ۴۳۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم، انرژی قابل متابولیسم ۲۵۸۰ کیلوکالری بر کیلوگرم، کلسیم ۰/۲۵ درصد و فسفر نیز ۱/۱ درصد به دست آمد.

شود و بر عملکرد و وضعیت آنتی اکسیدانی مرغ های تخم گذار تأثیر بگذارد، به طوری که گزارش شده است تغذیه جوجه های گوشتی با سطح بالایی از روغن کتان می تواند تعادل اکسیداتیو در بافت های حیوانی را مختل کند و حساسیت اکسیداتیو بالاتری را در گوشت ایجاد کند (González-Ortiz et al., 2013). با توجه به مطالب گفته شده، استفاده از آنتی اکسیدان ها در جیره های حاوی روغن کتان، امری حیاتی به نظر می رسد.

/اسپیروولینا پلاتنسیس (*Spirulina platensis*)، یک جلبک سبز-آبی (سیانوباکتری) است که به دلیل غلظت بالای پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، ویتامین ها، مواد معدنی و مواد فعال زیستی شناخته شده است (Anvar & Nowruzi, 2021). فراتر از این مواد مغذی ضروری، /اسپیروولینا پلاتنسیس سرشار از ترکیبات فعال زیستی است که فواید سلامتی مختلفی را ارائه می دهند. فیکوسیانین، یک کمپلکس رنگدانه-پروتئین موجود در ریزجلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس، دارای خواص آنتی اکسیدانی قوی است. فیکوسیانین به خنثی کردن رادیکال های آزاد کمک کرده و در نتیجه از سلول ها در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می کند (Fernandes et al., 2023). علاوه بر این، /اسپیروولینا پلاتنسیس می تواند باعث کاهش تنش و افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی در طیور شود (Mirzaie et al., 2017). گزارش شده است که افزودن /اسپیروولینا پلاتنسیس به جیره مرغ های تخم گذار، پتانسیل بهبود عملکرد، کیفیت تخم مرغ، کاهش کلاسترول سرم خون و افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی زرده تخم مرغ را دارد (Vui et al., 2024).

با توجه به اطلاعات ارائه شده می توان اظهار داشت که استفاده از روغن کتان در جیره مرغ های تخم گذار به عنوان منبع اسیدهای چرب امگا-۳ بلند زنجیر برای حفظ سلامت افراد جامعه اهمیت به سزایی دارد. از سوی دیگر، به دلیل بالا بودن مقدار چربی تخم مرغ و ماهیت غیراشباع روغن کتان در جیره، احتمال اکسید شدن آن ها وجود دارد. این مسئله می تواند باعث تولید ترکیبات مضر و رادیکال های آزاد شده و صدمات جبران ناپذیری به سلول های بدنی وارد کند و حتی زمینه ایجاد بیماری های خطرناکی نظیر سرطان را نیز به وجود آورد (Sidorkiewicz, 2024). در این شرایط برای جلوگیری از ایجاد چنین مشکلات، استفاده از آنتی اکسیدان های طبیعی نظیر جلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی، برای بهبود عملکرد و تولید تخم مرغ با کیفیت، لازم است که مطالعات دقیقی در مورد کمیت و کیفیت مکمل های مصرفی (از جمله روغن کتان به عنوان منبع اسیدهای چرب خانواده امگا و جلبک /اسپیروولینا پلاتنسیس به عنوان آنتی اکسیدان طبیعی)، سطوح قابل مصرف و ترکیب مناسب آن ها در جیره انجام شود. بنابراین پژوهش حاضر با

جدول ۱- اجزای تشکیل دهنده و ترکیب مواد مغذی جیره‌های غذایی آزمایشی

Table 1- The ingredients and nutrients composition of experimental diets

اجزاء (درصد جیره) Ingredients (% of the diet)	جیره شاهد Control diet	۱/۵ درصد روغن کتان 1.5% Flaxseed oil	۳ درصد روغن کتان 3% Flaxseed oil
ذرت Corn	60.48	57.55	53.36
کنجاله سویا (۴۴٪ پروتئین خام) (44% CP) Soybean meal	25.36	25.23	26.14
سبوس گندم Wheat bran	-	1.00	2.00
روغن سویا Soybean oil	0.3	0.3	0.3
روغن کتان Flaxseed oil	-	1.50	3.00
دی کلسیم فسفات Dicalcium phosphate	2.16	2.27	2.48
کربنات کلسیم Calcium carbonate	10.88	11.33	11.90
نمک طعام Common salt	0.32	0.32	0.32
جوش شیرین Sodium bicarbonate	0.10	0.10	0.10
دی ال- متیونین DL- methionine	0.10	0.10	0.10
مکمل ویتامینی ^۱ Vitamin premix	0.30	0.30	0.30
مکمل مواد معدنی ^۲ Mineral premix	0.30	0.30	0.30
ترکیبات مواد مغذی Nutrient composition			
انرژی قابل سوخت‌وساز (کیلوکالری بر کیلوگرم) Metabolizable energy (kcal/kg)	2680	2680	2680
پروتئین خام (%) Crude protein (%)	15.50	15.50	15.50
کلسیم (%) Calcium (%)	4.75	4.75	4.75
فسفر قابل دسترس (%) Available phosphorus (%)	0.39	0.39	0.39
سدیم (%) Sodium (%)	0.17	0.17	0.17
کلر (%) Chloride (%)	0.26	0.26	0.26
متیونین (%) Methionine (%)	0.36	0.36	0.36
متیونین + سیستئین (%) Methionine + cysteine (%)	0.64	0.64	0.64
لیزین (%) Lysine (%)	0.79	0.79	0.79

^۱مقادیر به‌ازاء هر کیلوگرم خوراک: ویتامین A، ۱۰۰۰۰ IU؛ ویتامین D_۳، ۲۵۰۰ IU؛ ویتامین E، ۱۰ IU؛ ویتامین B_۱، ۲۲ میلی‌گرم؛ ویتامین B_۲، چهار میلی‌گرم؛ ویتامین B_۳، هشت میلی‌گرم؛ ویتامین B_۶، دو میلی‌گرم؛ ویتامین B_{۱۲}، ۰/۵۶ میلی‌گرم؛ ویتامین B_{۱۳}، ۰/۱۵ میلی‌گرم؛ کولین، ۲۰۰ میلی‌گرم.

^۲مقادیر به‌ازاء هر کیلوگرم خوراک: منگنز، ۸۰ میلی‌گرم؛ آهن، ۵۰ میلی‌گرم؛ روی، ۶۰ میلی‌گرم؛ مس، ۱۲ میلی‌گرم؛ سدیم سولنیت، ۰/۳ میلی‌گرم.

¹ Supplied per kilogram of diet: vitamin A, 10000 IU; vitamin D₃, 2500 IU; vitamin E, 10 IU; vitamin B₁, 22 mg; vitamin B₂, 4 mg; vitamin B₃, 8 mg; vitamin B₆, 2 mg; vitamin B₉, 0.56 mg; vitamin B₁₂, 0.015 mg; choline, 200 mg.

² Supplied per kg of diet: manganese, 80 mg; Iron, 50 mg; zinc, 60 mg; copper, 12 mg; sodium selenite, 0.3 mg.

پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز) براساس روش‌های توصیه‌شده توسط شرکت سازنده کیت‌ها (پارس آزمون) اندازه‌گیری شدند (Mosayyeb Zadeh et al., 2023).

کلیه داده‌های به‌دست‌آمده، در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل ۳×۲ توسط نرم‌افزار SAS 9.4 و با رویه Mixed مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. مدل آماری طرح به‌صورت معادله ۲ بود.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + e_{ijk} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن، μ میانگین کل، A_i اثر سطح i ام روغن کتان، B_j اثر سطح j ام اسپیرولینا پلاتنسیس، AB_{ij} اثر متقابل سطح روغن کتان و اسپیرولینا پلاتنسیس و e_{ijk} اثر خطای آزمایشی یا عوامل ناشناخته در هر مشاهده بودند. بررسی معنی‌دار بودن اختلافات بین میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۲ اثر استفاده از ریزجلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره-های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر عملکرد مرغ‌های تخم‌گذار را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، درصد تولید، وزن و توده تخم‌مرغ و ضریب تبدیل خوراک تحت تأثیر اثرات اصلی روغن کتان و ریزجلبک/اسپیرولینا پلاتنسیس و نیز اثر متقابل روغن کتان و اسپیرولینا پلاتنسیس قرار گرفتند. مرغ‌های تغذیه‌شده با تیمار حاوی سه درصد روغن کتان با یا بدون اسپیرولینا پلاتنسیس، بیشترین درصد تولید و وزن و توده تخم‌مرغ را داشتند که به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمارهای بدون روغن کتان بیشتر بود ($P < 0.05$). استفاده از سه درصد روغن کتان همراه با پنج گرم در کیلوگرم/اسپیرولینا پلاتنسیس باعث کاهش ضریب تبدیل خوراک نسبت به سایر تیمارهای آزمایشی شد ($P < 0.05$).

موافق با نتایج پژوهش حاضر، محققین گزارش کردند که استفاده از روغن کتان باعث افزایش تولید و وزن تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار شد (Attia et al., 2022). به‌طور مشابه، اهر و همکاران (Ehr et al., 2017) نشان دادند که راندامان مصرف خوراک در مرغ-های تخم‌گذار با افزایش سطح روغن بذر کتان (۰، ۱، ۲، ۳، ۵ درصد) افزایش یافت. در مقابل، چندین مطالعه گزارش کردند که افزودن دو تا سه درصد روغن بذر کتان به جیره مرغ‌های تخم‌گذار هیچ تغییر قابل توجهی در عملکرد تولید ایجاد نکرد (Ceylan et al., 2011; Neijat et al., 2016). با این حال، به‌دلیل وجود عوامل ضدتغذیه‌ای در بذر کتان، مرغ‌های تخم‌گذار تغذیه‌شده با جیره غذایی حاوی پنج درصد یا سطوح بالاتر روغن بذر کتان، تولید تخم‌مرغ را

برای ارزیابی شاخص‌های عملکرد، تخم‌مرغ‌ها دو بار در طول روز (ساعت ۱۰ صبح و ۴ بعد از ظهر) جمع‌آوری و تعداد و وزن جمعی تخم‌مرغ‌ها در پایان هر روز ثبت می‌شد. توده تخم‌مرغ، مصرف خوراک و ضریب تبدیل خوراک به‌صورت هفتگی محاسبه گردید. بدین صورت که درصد تولید تخم‌مرغ با تقسیم تعداد تخم‌مرغ‌های تولیدشده در هر تکرار بر روز مرغ آن محاسبه گردید. توده تخم‌مرغ با ضرب کردن میانگین وزن تخم‌مرغ هر تکرار در درصد تولید تخم‌مرغ آن به دست آمد. همچنین ضریب تبدیل خوراک با تقسیم مقدار خوراک مصرفی بر توده تخم‌مرغ محاسبه شد (Ebrahimi et al., 2025).

برای تعیین هزینه خوراک به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ تولیدی از معادله ۱ استفاده شد (Nampijja et al., 2023).

معادله (۱) قیمت هر کیلوگرم خوراک مصرفی $\times$ ضریب تبدیل خوراک = هزینه خوراک به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ

برای بررسی فراسنجه‌های خونی، تعداد دو نمونه سرم از هر تکرار (۱۲ نمونه به‌ازای هر تیمار) در انتهای دوره آزمایش تهیه شد. نمونه‌های خون از ورید بال تهیه شده و با قرار دادن سرنگ‌های پنج سی‌سی حاوی خون به‌صورت زاویه‌دار در دمای اتاق به‌مدت شش ساعت، نمونه‌های سرم استحصال گردید. جهت دستیابی به نمونه‌های بهتر و شفاف‌تر، نمونه‌های سرم به‌مدت ۱۲ دقیقه و با دور ۵۶۰۰ سانتریفیوژ شدند. نمونه‌ها در دمای -20°C درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه بیوشیمیایی مرکز تحقیقات دارویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز منتقل گردید. برای ارزیابی وضعیت آنتی‌اکسیدانی کبد، در پایان دوره آزمایش تعداد شش قطعه مرغ از هر تیمار کشتار و پس از باز کردن لاشه، کبد پرندگان جدا و برای ارزیابی ظرفیت کل آنتی-اکسیدانی، فعالیت مالون‌دی‌آلدئید و آنزیم‌های گلو‌تاتیون پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز، یک گرم کبد به آزمایشگاه ارسال شد (Mosayyeb Zadeh et al., 2023). برای اندازه‌گیری لیپیدهای زرده، ۱۰۰ میلی‌گرم زرده تخم‌مرغ به‌وسیله ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۱ گرم؛ مدل JT3003D، ساخت چین) توزین و با ۲/۵ میلی‌لیتر محلول سدیم هیدروکسید ۰/۰۵ نرمال مخلوط و پس از ۲۴ ساعت با ۲/۵ میلی‌لیتر محلول اسیدکلریدریک ۰/۲۵ نرمال خنثی شد. نمونه‌ها (کبد، زرده و سرم) با استفاده از دستگاه آنالیز خودکار (Autoanalyser؛ مدل RA 1000، Bayer، Technicon) و کیت‌های تهیه‌شده از شرکت پارس آزمون مورد آزمایش قرار گرفتند. لیپیدهای سرم خون (شامل کلسترول، تری‌گلیسرید و VLDL) و زرده تخم‌مرغ (شامل کلسترول و تری‌گلیسرید) در طول موج ۵۵۰ نانومتر براساس روش آنزیمی و فراسنجه‌های آنتی‌اکسیدانی سرم خون (ظرفیت کل آنتی‌اکسیدانی و فعالیت مالون‌دی‌آلدئید) و کبد (ظرفیت کل آنتی‌اکسیدانی، فعالیت مالون‌دی‌آلدئید، آنزیم گلو‌تاتیون

به‌طور قابل توجهی کاهش دادند (Kim et al., 2016).

جدول ۲- اثرات استفاده از اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره‌های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر عملکرد مرغ‌های تخم‌گذار

Table 2- Effects of using *spirulina platensis* in diets containing different levels of flaxseed oil on the performance of laying hens

عامل Factor	متغیر Variable					
	درصد تولید Egg production (%)	وزن تخم‌مرغ Egg weight (g)	توده تخم‌مرغ Egg mass (g/d/bird)	مصرف خوراک Feed intake (g/d/bird)	ضریب تبدیل خوراک Feed conversion ratio	هزینه به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ Cost per kilogram of eggs (Toman)
روغن کتان (%)						
Flaxseed oil (%)						
0	75.58 ^b	58.76 ^c	44.41 ^c	98.85	2.23 ^a	40921.35 ^b
1.5	78.26 ^a	59.76 ^b	46.23 ^b	99.10	2.13 ^b	42254.71 ^{ab}
3	78.41 ^a	61.26 ^a	47.81 ^a	98.95	2.06 ^c	44038.21 ^a
خطای استاندارد SEM	0.68	0.29	0.37	1.13	0.02	439.64
سطح احتمال معنی‌داری P-value	0.005	0.01	0.02	0.44	0.01	0.01
اسپیروولینا (گرم در کیلوگرم)						
<i>Spirulina</i> (g/kg)						
0	76.64 ^b	59.50 ^b	45.33 ^b	98.86	2.19 ^a	41631.67 ^b
5	78.19 ^a	60.36 ^a	46.97 ^a	99.06	2.09 ^b	43177.26 ^a
خطای استاندارد SEM	0.39	0.23	0.30	1.11	0.02	415.81
سطح احتمال معنی‌داری P-value	0.01	0.02	0.01	0.21	0.005	0.02
روغن کتان × اسپیریولینا						
Flaxseed oil × <i>Spirulina platensis</i>						
0×0	75.48 ^b	58.67 ^b	44.28 ^c	98.90	2.32 ^a	40611.24 ^b
0×5	75.69 ^b	58.86 ^b	44.55 ^b	98.80	2.22 ^a	41231.47 ^b
1.5×0	76.93 ^{ab}	59.22 ^{ab}	45.21 ^{bc}	98.90	2.18 ^{ab}	41160.56 ^b
1.5×5	79.58 ^{ab}	60.29 ^a	47.24 ^{bc}	99.30	2.10 ^{ab}	43348.80 ^a
3×0	77.52 ^a	60.59 ^a	46.50 ^b	98.80	2.12 ^{ab}	43123.66 ^a
3×5	79.31 ^a	61.92 ^a	49.12 ^a	99.10	2.02 ^b	44953.50 ^a
خطای استاندارد SEM	0.72	0.41	0.53	1.19	0.05	628.37
سطح احتمال معنی‌داری P-value	0.02	0.003	0.008	0.40	0.01	0.001

^{a-c} در هر ستون در هر بخش، میانگین‌های دارای حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند (P < 0.05).

^{a-c} Means within each column of each section with different superscripts are significantly different (P < 0.05).

سه وظیفه اصلی دستگاه گوارش یعنی هضم، جذب و جلوگیری از نفوذ عوامل بیماری‌زا به بدن که تقریباً ۲۵ درصد میزان انرژی مصرف شده را به خود اختصاص می‌دهد (Hamard et al., 2010)، اظهار داشتند که استفاده از منابع چربی، به‌دلیل کاهش سرعت عبور مواد خوراکی و ادامه فرآیند هضم و جذب مواد مغذی تا قسمت‌های انتهایی روده، انرژی و به‌خصوص برخی از اسیدهای چرب ضروری مورد نیاز سلول‌های تمام قسمت‌های روده را فراهم کرده و به‌نمو

تناقض بین نتایج گزارش‌شده ممکن است به‌دلیل تغییرات در ترکیب جیره آزمایشی، سطح روغن کتان، سن پرندگان و مدت زمان تغذیه باشد. گزارش شده است که بهتر شدن عملکرد با تغذیه جیره‌های حاوی روغن‌های گیاهی می‌تواند ناشی از تأثیر این منابع چربی بر نمو بافت روده و افزایش ماندگاری مواد خوراکی مصرف‌شده در محیط روده باشد؛ چرا که این شرایط موجب افزایش هضم و جذب مواد مغذی می‌شوند (Shahryari et al., 2021). محققان با اشاره به

پلاتنسیس ممکن است تخمدان‌ها را تحریک کرده و باعث رشد تخمک‌های بزرگ‌تر شده باشد که به‌ویژه برای تولید کنندگان تخم-مرغ که به دنبال افزایش اندازه تخم‌مرغ برای تأمین تقاضای بازارهای خاص هستند، مفید است.

نتایج هزینه خوراک به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ تولیدی نیز نشان داد که استفاده از پنج گرم اسپیرولینا همراه با ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان و همچنین ۳ درصد روغن کتان بدون اسپیرولینا باعث افزایش هزینه خوراک به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ شدند ($P < 0.05$). این یافته‌ها با گزارش‌های پیشین هم‌خوانی دارد، به‌طوری‌که ال-زناری و همکاران (El-Zenary et al., 2023) بیان کردند که گنجاندن منابع غنی از PUFA مانند روغن بذر کتان در جیره مرغ‌های تخم‌گذار اگرچه می‌تواند هزینه خوراک را افزایش دهد، اما منجر به بهبود کیفیت تغذیه‌ای تخم‌مرغ می‌شود. از آنجاکه هزینه خوراک به‌ازای هر کیلوگرم تخم‌مرغ تا حد زیادی تحت تأثیر ضریب تبدیل خوراک قرار دارد، بروز چنین افزایشی قابل انتظار است. باین‌حال، باید توجه داشت که هدف اصلی این پژوهش صرفاً بهبود شاخص‌های تولیدی نبوده است، بلکه دستیابی به تخم‌مرغ‌های فراسودمند با کلسترول کمتر و پروفایل مطلوب‌تر اسیدهای چرب (به‌ویژه افزایش امگا-۳) مد نظر بوده است. یافته‌های مشابه توسط لی و همکاران (Lee et al., 2021) نیز گزارش شده که افزودن روغن بذر کتان به جیره، محتوای اسیدهای چرب امگا-۳ را در تخم‌مرغ به‌طور معنی‌داری افزایش داده و ارزش تغذیه‌ای آن را ارتقاء می‌دهد. بنابراین، اگرچه هزینه خوراک در برخی تیمارها افزایش یافت، اما این تغییر با ارتقاء کیفیت تغذیه‌ای محصول و تولید تخم‌مرغ‌های غنی از امگا-۳ که مورد توجه مصرف‌کنندگان و صنایع غذایی است، توجیه‌پذیر خواهد بود.

فراسنجه‌های لیپیدی سرم خون و زرده تخم‌مرغ

جدول ۳، اثر استفاده از اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره‌های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر فراسنجه‌های لیپیدی سرم خون و زرده تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که برهم‌کنش اسپیرولینا پلاتنسیس و روغن کتان اثرات هم‌افزایی بر غلظت تری‌گلیسرید و VLDL سرم خون داشت و سطوح ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان همراه با پنج گرم اسپیرولینا پلاتنسیس، غلظت تری‌گلیسرید و VLDL سرم خون را به‌طور معنی‌داری کاهش دادند. همچنین سطوح ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان باعث کاهش غلظت کلسترول سرم خون شدند ($P < 0.05$). اثرات اصلی روغن کتان نشان داد که مصرف سه درصد روغن کتان باعث کاهش کلسترول زرده تخم‌مرغ گردید ($P < 0.05$). اثر متقابل پنج گرم اسپیرولینا پلاتنسیس و ۳ درصد روغن کتان باعث کاهش

فیزیولوژیکی و عملکرد بهتر دستگاه گوارش کمک می‌کنند (Schweitzer et al., 2015). از سوی دیگر، مرغ‌های تخم‌گذار سوخت‌وساز چربی بسیار قوی در بدن، به‌ویژه در دوره اوج تولید تخم-مرغ دارند. روغن‌ها به‌عنوان یکی از مواد مغذی ضروری برای رشد حیوانات و یکی از اجزاء اصلی زرده تخم‌مرغ، نقش مهمی در تنظیم عملکرد تولید مرغ‌های تخم‌گذار و وزن تخم‌مرغ دارند. بنابراین عملکرد تولید و وزن تخم‌مرغ در مرغ‌های تخم‌گذار ممکن است با مکمل‌سازی جیره با روغن‌های مختلف بهبود یابد. در طول دوره تولید مرغ‌های تخم‌گذار، شدت سوخت‌وساز لیپید در بدن افزایش می‌یابد و روغن‌های موجود در خوراک بیشتر از طریق تخمدان‌ها وارد تخم‌ها می‌شوند. روغن‌های رایج در خوراک، به‌ویژه روغن‌های گیاهی، غنی از اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه هستند. بیشتر این اسیدهای چرب رابطه مهمی با عملکرد تولیدی مرغ‌های تخم‌گذار نشان می‌دهند. به‌طور خاص، اسیدلینولئیک و اسیدلینولئیک نقش تعیین‌کننده‌ای در تولیدمثل مرغ‌های تخم‌گذار دارند (Sakai et al., 2017). مکمل‌های غذایی حاوی اسیدلینولئیک، وزن تخم‌مرغ را افزایش می‌دهند (Vlaicu et al., 2021). علاوه بر این، هنگامی که جیره مرغ‌های تخم‌گذار نیاز به اسیدلینولئیک را برآورده می‌کند، افزودن مکمل روغن به‌طور قابل توجهی وزن تخم‌مرغ را به‌طور مستقل افزایش می‌دهد بدون اینکه بر انرژی قابل سوخت‌وساز جیره و مقدار اسیدلینولئیک تأثیر بگذارد (Aguillón-Páez et al., 2020). بنابراین در آزمایش حاضر، استفاده از سطوح ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان در مقایسه با سطح صفر درصد، احتمالاً به‌دلیل فراهم کردن نسبت مطلوب‌تری از انرژی و به‌تبع آن آلفا-لینولئیک اسید به همراه بهبود بافت‌شناسی روده و هضم و جذب مواد مغذی (از طریق کاهش سرعت عبور مواد در روده باریک) موجب بهبود عملکرد مرغ‌های تخم‌گذار شد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، مکمل اسپیرولینا پلاتنسیس به‌دلیل حمایت آنتی‌اکسیدانی، اثرات هم‌افزایی با روغن کتان داشت و باعث افزایش درصد تولید، وزن و توده تخم‌مرغ شد. موافق با نتایج حاضر، محققین بهبود ضریب تبدیل خوراک، وزن و تولید تخم‌مرغ را در مرغ‌های تغذیه‌شده با جیره حاوی دو درصد اسپیرولینا پلاتنسیس گزارش کردند (Panaite et al., 2023). این اثرات مثبت اسپیرولینا پلاتنسیس را می‌توان به وجود مقدار بالای پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، ویتامین‌ها و مواد معدنی موجود در آن و همچنین وجود برخی ترکیبات فعال زیستی مانند β -کاروتن و γ -لینولئیک اسید و آنتی‌اکسیدان‌ها در این ریزجلبک نسبت داد (Anvar & Nowruzi, 2021). در پژوهشی مشابه (Salahuddin et al., 2024)، مرغ‌های تخم‌گذار تغذیه‌شده با ۲/۵ و ۵ گرم اسپیرولینا پلاتنسیس بر کیلوگرم خوراک، وزن و تولید تخم‌مرغ بیشتری داشتند. این پژوهشگران گزارش کردند که مواد مغذی موجود در ریزجلبک اسپیرولینا

میزان تری‌گلیسرید زرده تخم‌مرغ نسبت به شاهد گردید.

به‌طور مشابه، در تحقیقی سطوح مختلف دانه کتان اکسترودر شده تا ۱۲ درصد به‌طور قابل توجهی با کاهش کلسترول و تری‌گلیسرید پلاسمای خون مرتبط بودند (Gheorghe et al., 2020). علاوه‌بر این، باتکوفسکا و همکاران (Batkowska et al., 2021) گزارش کردند که تغذیه مرغ‌های تخم‌گذار با جیره شاهد در مقایسه با روغن کتان، سطح تری‌گلیسرید، کلسترول کل و VLDL را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. علاوه‌بر این، گائو و همکاران (Gao et al., 2021) دریافت که افزودن ۲/۵ و ۵ درصد روغن کتان به جیره مرغ-های تخم‌گذار به‌مدت ۱۱ هفته به‌تدریج سطح کل چربی و کلسترول پلاسمای خون را کاهش داد. کاهش غلظت لیپیدی پلاسمای خون را می‌توان به کاهش تقاضا برای سنتز لیپید نسبت داد (Xu et al., 2025) که می‌تواند به‌دلیل اثر منفی دانه کتان بر قابلیت هضم و سوخت‌وساز لیپید باشد، به‌طوری‌که محققین گزارش کردند، جوجه-های گوشتی که جیره‌های حاوی منابع دارای سطح بالای اسیدهای چرب امگا-۳ را دریافت کردند، کلسترول، تری‌گلیسرید و LDL کمتری را در سرم خون نشان دادند (Long et al., 2020) که ممکن است به‌دلیل سطح بالای اسیدهای چرب امگا-۳ باشد که مقادیر تری‌گلیسرول‌ها و لیپوپروتئین‌ها را از طریق سرکوب تری‌گلیسرید و سنتز آپولیپوپروتئین B تنظیم می‌کند (Attia et al., 2022). علاوه‌بر این، اسیدهای چرب امگا-۳ می‌توانند فعالیت آنزیم $\Delta 9$ -دسچوراز را مهار کنند و سنتز VLDL کبدی را کاهش داده و از سوخت‌وساز تری‌گلیسرول جلوگیری کنند (Long et al., 2018). همچنین، اسیدهای چرب امگا-۳ می‌توانند بیان ژن لیپین-۱ را که به کنترل فاکتورهای رونویسی متصل به DNA برای تنظیم رونویسی ژن کمک می‌کند، بهبود بخشند. بنابراین سنتز تری‌گلیسرید را تنظیم می‌کنند (Schweitzer et al., 2015).

نتایج مربوط به الگوی لیپیدهای زرده تخم‌مرغ نشان داد که سطوح مختلف روغن کتان باعث کاهش غلظت تری‌گلیسریدها و کلسترول کل شد. این نتایج نشان دادند که افزایش امگا-۳ و اسیدهای چرب غیراشباع که با مصرف روغن کتان در جیره غذایی مرغ‌ها مرتبط بودند، اثرات مشابهی بر الگوی لیپیدی پلاسمای خون و الگوی چربی زرده نشان دادند. پیش‌سازهای لیپیدهای زرده در کبد سنتز شده و توسط ورید باب به تخمدان برای تشکیل زرده منتقل می‌شوند (Attia et al., 2016). کاهش غلظت تری‌گلیسریدها و کلسترول کل در زرده می‌تواند ناشی از کاهش غلظت تری‌گلیسرید در گردش خون پرندگان به‌دلیل افزایش مصرف امگا-۳ در جیره حاوی روغن کتان و به‌طور بالقوه محدود کردن قابلیت دسترسی لیپیدها برای تشکیل زرده باشد. نشان داده شده است که افزایش منابع امگا-۳ در جیره غذایی بر استرادیول در گردش خون تأثیر می‌گذارد (Fabro et al., 2021) و قابلیت هضم ظاهری چربی را کاهش می‌-

دهد (Kristensen et al., 2013). سپهر و همکاران (Sepehr et al., 2021) دریافتند که چربی کبد در پرندگانی که با بذر کتان تغذیه شده بودند به‌طور قابل توجهی کمتر بود که با افزایش قابل توجه اسیدهای چرب امگا-۳ (به‌ویژه اسیدلینولیک) در کبد همراه بود. تجمع چربی در بافت‌های حیوانی مانند زرده، کبد، مجرای تخم و بافت چربی محوطه شکمی تحت تأثیر سطوح و انواع لیپیدها قرار می‌گیرد (Zita et al., 2022).

در مطالعه‌ای، استفاده از پنج گرم در کیلوگرم/اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره‌های با یا بدون روغن کتان باعث کاهش سطوح تری‌گلیسرید و VLDL شد. چنین اثر هیپوکلسترولمی اسپیرولینا پلاتنسیس در مطالعات قبلی بر موش‌های آزمایشگاهی (El-Moataaz et al., 2019) و به‌طور خاص بر جوجه‌های گوشتی نشان داده شده است (Mirzaie et al., 2017). دنگ و چو (Deng & Chow, 2010) گزارش دادند که اسپیرولینا پلاتنسیس حاوی اسید γ -لینولیک است که به متابولیت‌های کلسترول در صفرا متصل می‌شود و از تجمع آن جلوگیری می‌کند. همچنین محققین بیان کردند که کاهش سطح کلسترول ممکن است با اثرات بازدارنده/اسپیرولینا پلاتنسیس بر فعالیت آنزیم HMG-CoA ردوکتاز که یک آنزیم آلوتریک مورد نیاز برای سنتز کلسترول در کبد است، مرتبط باشد (Mousavi et al., 2017). محققین بر این باورند که مهار آنزیم سنتزکننده استیل کوانزیم A توسط اسپیرولینا پلاتنسیس که برای بیوسنتز اسیدهای چرب ضروری است باعث کاهش تری‌گلیسرید می‌شود (Jing et al., 2017).

وضعیت آنتی‌اکسیدانی

اثر استفاده از اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره‌های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر فراسنجه‌های آنتی‌اکسیدانی کبد و سرم خون مرغ‌های تخم‌گذار در جدول ۴ گزارش شده است. اثر متقابل اسپیرولینا پلاتنسیس و سطح روغن کتان نشان داد که جیره‌های حاوی ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان باعث کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل و سوپراکسید دیسموتاز کبد و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل سرم خون شدند و استفاده از پنج گرم در کیلوگرم/اسپیرولینا پلاتنسیس، شاخص‌های مذکور را در این جیره‌ها افزایش داد ($P < 0.05$). همچنین میزان مالون‌دی‌آلدئید سرم خون در مرغ‌های تغذیه‌شده با جیره‌های حاوی ۱/۵ و ۳ درصد روغن کتان بدون اسپیرولینا پلاتنسیس افزایش یافت که افزودن اسپیرولینا پلاتنسیس توانست این افزایش ناشی از روغن کتان را جبران کند و میزان مالون‌دی‌آلدئید حتی کمتر از شاهد شد ($P < 0.05$). افزایش مقدار مالون‌دی‌آلدئید در کبد پرندگانی که با جیره حاوی سه درصد روغن کتان تغذیه شدند، به احتمال زیاد به وجود غلظت بالاتر اسیدهای چرب غیراشباع دارای زنجیره بلند که

به شدت مستعد پراکسیداسیون هستند، مرتبط است.

جدول ۳- اثر استفاده از اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر فراستجه های لیپیدی سرم خون و زرده تخم مرغ در مرغ های تخم گذار
Table 3- Effect of using *spirulina platensis* in diets containing different levels of flaxseed oil on blood serum and egg yolk lipid parameters in laying hens

عامل Factor	خون Blood			زرده تخم مرغ Egg yolk	
	تری گلیسرید Triglyceride (mg/dl)	کلسترول Cholesterol (mg/dl)	VLDL ¹ (mg/dl)	تری گلیسرید Triglyceride (mg/dl)	کلسترول Cholesterol (mg/dl)
روغن کتان (%) Flaxseed oil (%)					
0	3043.23 ^a	214.61 ^a	602.82 ^a	170.98 ^a	19.29 ^a
1.5	2842.57 ^b	210.53 ^b	564.46 ^b	165.50 ^b	18.76 ^b
3	2637.54 ^c	201.54 ^c	516.78 ^c	163.90 ^b	18.16 ^c
خطای استاندارد SEM	51.22	7.26	13.16	1.08	0.15
سطح احتمال معنی داری P-value	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
اسپیرولینا پلاتنسیس (گرم در کیلوگرم) <i>Spirulina platensis</i> (g/kg)					
0	2929.34 ^a	208.5	583.75 ^a	169.23 ^a	18.77
5	2752.61 ^b	209.3	538.82 ^b	164.41 ^b	18.71
خطای استاندارد SEM	47.77	8.03	12.77	0.88	0.12
سطح احتمال معنی داری P-value	0.01	0.60	0.03	0.03	0.68
روغن کتان × اسپیرولینا پلاتنسیس Flaxseed oil × <i>Spirulina platensis</i>					
0×0	3120.19 ^a	215.61	624.13 ^a	172.47 ^a	19.34
0×5	2966.42 ^{ab}	214.23	581.67 ^b	169.53 ^a	19.24
1.5×0	2921.75 ^{ab}	209.17	576.65 ^b	167.49 ^{ab}	18.79
1.5×5	2764.28 ^b	212.05	552.22 ^b	163.62 ^{ab}	18.74
3×0	2747.06 ^b	201.64	550.61 ^b	167.86 ^{ab}	18.20
3×5	2528.92 ^c	201.52	482.76 ^c	160.14 ^b	18.12
خطای استاندارد SEM	41.32	11.79	13.06	2.52	0.94
سطح احتمال معنی داری P-value	0.002	0.55	0.006	0.24	0.21

^{a-c} در هر ستون در هر بخش، میانگین های دارای حروف متفاوت دارای اختلاف معنی داری می باشند (P < 0.05).

¹ لیوپروتئین با چگالی خیلی کم

^{a-c} Means within each column of each section with different superscripts are significantly different (P < 0.05).

¹Very low density lipoprotein

محافظتی مانند میکروزوم های کبدی که توانایی تولید و تخریب مالون دی آلدئید را دارند، در سطوح طبیعی حفظ شده است (Ehr et al., 2017). این یافته ها ممکن است نشان دهند که سطح مالون دی آلدئید در کبد به دلیل فراهم بودن بستر برای تولید اسیدتیوباریتوریک در کبد و یا تجمع اسیدتیوباریتوریک تولیدشده در سایر انتقال ها از طریق خون در گردش، شاخص حساس تری از تمایل پراکسیداتیو است. در جدیدترین مطالعات انجام شده، افزایش مالون دی آلدئید زرده

این مسئله ممکن است نشان دهد که سطح سه درصد روغن کتان، تشکیل محصول پراکسیداسیون لیپیدی را افزایش می دهد (Lee et al., 2021). به نظر می رسد که مقدار اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه موجود در جیره، نقش کلیدی در افزایش حساسیت بافت به اکسیداسیون روغن کتان دارد. اثر غیر معنی دار روغن کتان بر سطح مالون دی آلدئید سرم خون ممکن است نشان دهد که مالون دی آلدئید سرم خون توسط برخی سازوکارهای

تخم مرغ به دلیل افزایش اسیدهای چرب غیراشباع مشاهده شد، چرا که اسیدهای چرب غیراشباع به شدت مستعد اکسیداسیون بوده و از این رو میزان ترکیبات اسیدتیوباربیتوریک یا همان مالون دی آلدئید زرده تخم مرغ های تازه و تخم مرغ های نگهداری شده در دمای چهار

درجه سانتی گراد به مدت ۲۸ روز، افزایش یافت (Kralik et al., 2021).

جدول ۴- اثرات استفاده از اسپیرولینا پلاتنسیس در جیره های حاوی سطوح مختلف روغن کتان بر پارامترهای آنتی اکسیدانی کبد و سرم خون مرغ های تخم گذار

Table 4- Effects of using *spirulina platensis* in diets containing different levels of flaxseed oil on antioxidant parameters of liver and blood serum of laying hens

عامل Factor	خون Blood		کبد Liver			
	ظرفیت آنتی اکسیدانی کل TAC ¹ (mmol/ml)	مالون دی آلدئید MDA (mmol/l)	ظرفیت آنتی اکسیدانی کل TAC (mmol/ml)	مالون دی آلدئید MDA (mmol/l)	گلوکوتاتیون پراکسیداز GPx (mmol/dl)	سوپراکسید دیسموتاز SOD (μg/ml)
روغن کتان (%) Flaxseed oil (%)						
0	1.39	2.22	1.30	0.31 ^b	4.95	15.61
1.5	1.30	2.37	1.06	0.35 ^{ab}	5.18	16.01
3	1.29	2.50	1.17	0.38 ^a	5.17	15.12
خطای استاندارد SEM	0.04	0.10	0.07	0.02	0.17	0.40
سطح احتمال معنی داری P-value	0.62	0.52	0.11	0.03	0.30	0.27
اسپیرولینا پلاتنسیس (گرم در کیلوگرم) <i>Spirulina platensis</i> (g/kg)						
0	1.18 ^b	2.78 ^a	1.01 ^b	0.37	4.77 ^b	14.42 ^b
5	1.31 ^a	1.89 ^b	1.31 ^a	0.33	5.46 ^a	17.32 ^a
خطای استاندارد SEM	0.01	0.04	0.03	0.01	0.13	0.21
سطح احتمال معنی داری P-value	0.01	0.02	0.01	0.07	0.02	0.01
روغن کتان × اسپیرولینا پلاتنسیس Flaxseed oil × <i>Spirulina platensis</i>						
0×0	1.33 ^{ab}	2.36 ^{ab}	1.18 ^{ab}	0.33	4.50	14.29 ^b
0×5	1.47 ^a	1.94 ^b	1.41 ^a	0.29	5.30	17.98 ^a
1.5×0	1.21 ^b	2.72 ^a	0.96 ^b	0.34	4.87	13.02 ^b
1.5×5	1.36 ^a	1.97 ^b	1.17 ^{ab}	0.35	5.48	14.77 ^b
3×0	1.16 ^b	3.24 ^a	0.98 ^b	0.41	4.95	13.72 ^b
3×5	1.38 ^a	1.77 ^b	1.37 ^a	0.36	5.58	16.71 ^a
خطای استاندارد SEM	0.06	0.09	0.05	0.02	0.24	0.33
سطح احتمال معنی داری P-value	0.03	0.03	0.01	0.16	0.20	0.04

^{a-b} در هر ستون هر بخش، میانگین های دارای حروف متفاوت دارای اختلاف معنی داری می باشند (P < 0.05).

TAC¹: ظرفیت آنتی اکسیدانی کل؛ MDA: مالون دی آلدئید؛ GPx: گلوکوتاتیون پراکسیداز؛ SOD: سوپراکسید دیسموتاز.

^{a-b} Means within each column of each section with different superscripts are significantly different (P < 0.05).

¹TAC: total antioxidant capacity; MDA: malondialdehyde; GPX: glutathione peroxidase; SOD: superoxide dismutase.

پلاتنسیس در جیره‌های حاوی روغن کتان از این واقعیت حمایت می‌کند که این ترکیبات زیست فعال می‌توانند به‌طور مؤثری از سلول‌های کبدی در برابر رادیکال‌های آزاد تولیدشده توسط پراکسیداسیون لیپیدی محافظت کنند و بنابراین قدرت آنتی‌اکسیدانی و سلامت سلول را افزایش دهند (Li et al., 2023). بنابراین مطالعه حاضر شواهدی را نشان می‌دهند که اسپیرولینا پلاتنسیس می‌تواند به خون و کبد مرغ‌های تخم‌گذار نفوذ کرده و به‌طور مؤثری از پراکسیداسیون لیپیدها جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد و فراسنجه‌های لیپیدی خون در مرغ‌های تخم‌گذار در پایان دوره، می‌توان از سطوح ۱/۵ تا ۳ درصد روغن کتان در جیره استفاده کرد. با این حال، استفاده از این سطوح (به‌ویژه سطح ۳ درصد) به‌دلیل افزایش خطر پراکسیداسیون لیپیدها، مستلزم کاربرد یک آنتی‌اکسیدان طبیعی مانند ریز جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس است.

تأثیر منفی پراکسیداسیون بر طیور، عمدتاً با اختلال در وضعیت ردوکس همراه است (Akbarian et al., 2016). نتایج کنونی نشان دادند که افزایش مالون‌دی‌آلدئید کبد که یکی از شاخص‌های تنش اکسیداتیو است، با اضافه شدن اسپیرولینا پلاتنسیس به جیره‌های حاوی روغن کتان کاهش یافت، درحالی‌که فعالیت آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل با مصرف تیمارهای حاوی اسپیرولینا پلاتنسیس افزایش یافتند. ظرفیت اسپیرولینا پلاتنسیس برای بازگرداندن تعادل ردوکس در جیره‌های حاوی روغن کتان را می‌توان به ترکیبات آنتی‌اکسیدانی فعال زیستی آن مانند فلاونوئیدها و پلی‌فنول‌ها و سایر آنتاگونیست‌های رادیکال‌های آزاد مانند α -توکوفرول، اسیدآسکوربیک، بتاکاروتن و سلنیوم نسبت داد (Agustini et al., 2015) که نشان دهنده انتقال احتمالی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی اسپیرولینا پلاتنسیس به بدن مرغ است. موافق با نتایج این پژوهش، پانایت و همکاران (Panaite et al., 2023) نشان دادند که افزودن اسپیرولینا پلاتنسیس به جیره، بهبود قابل توجهی در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوکاتایون پراکسیداز) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل نشان داد. بهبود سطح مالون‌دی‌آلدئید، گلوکاتایون پراکسیداز و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی توسط اسپیرولینا

References

1. Aguillón-Páez, Y. J., Romero, L. A., & Diaz, G. J. (2020). Effect of full-fat sunflower or flaxseed seeds dietary inclusion on performance, egg yolk fatty acid profile and egg quality in laying hens. *Animal Nutrition*, 6(2), 179-184. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.12.005>
2. Agustini, T. W., Suzery, M., Sutrisnanto, D., & Ma'ruf, W. F. (2015). Comparative study of bioactive substances extracted from fresh and dried *Spirulina* sp. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.01.042>
3. Akbarian, A., Michiels, J., Degroote, J., Majdeddin, M., Golian, A., & De Smet, S. (2016). Association between heat stress and oxidative stress in poultry; mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 7, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0097-5>
4. Anvar, A. A., & Nowruzi, B. (2021). Bioactive properties of spirulina: A review. *Bioactive Materials*, 4, 134-142. <http://dx.doi.org/10.25163/microbbioacts.412117B0719110521>
5. Attia, Y. A., Abd El-Hamid, A. E. H. E., Abedalla, A. A., Berika, M. A., Al-Harhi, M. A., Kucuk, O., & Abou-Shehema, B. M. (2016). Laying performance, digestibility and plasma hormones in laying hens exposed to chronic heat stress as affected by betaine, vitamin C, and/or vitamin E supplementation. *SpringerPlus*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3304-0>
6. Attia, Y. A., Al-Harhi, M. A., Sagan, A. A., Abdulsalam, N. M., Hussein, E. O., & Olal, M. J. (2022). Egg production and quality, lipid metabolites, antioxidant status and immune response of laying hens fed diets with various levels of soaked flax seed meal. *Agriculture*, 12(9), 1402-1415. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091402>
7. Batkowska, J., Drabik, K., Brodacki, A., Czech, A., & Adamczuk, A. (2021). Fatty acids profile, cholesterol level and quality of table eggs from hens fed with the addition of linseed and soybean oil. *Food Chemistry*, 334, 127612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127612>
8. Ceylan, N., Ciftçi, I., Mizrak, C., Kahraman, Z., & Efil, H. (2011). Influence of different dietary oil sources on performance and fatty acid profile of egg yolk in laying hens. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 20(1), 137-151. <http://doi.org/10.22358/jafs/66159/2011>
9. Christie, W. W., & Harwood, J. L. (2020). Oxidation of polyunsaturated fatty acids to produce lipid mediators. *Essays in Biochemistry*, 64(3), 401-421. <https://doi.org/10.1042/EBC20190082>
10. Deng, R., & Chow, T. J. (2010). Hypolipidemic, antioxidant, and antiinflammatory activities of microalgae

- Spirulina. Cardiovascular Therapeutics*, 28(4), 33-45. <https://doi.org/10.1111/j.1755-5922.2010.00200.x>
11. Djousse, L., Gaziano, J. M., Buring, J. E., & Lee, I. M. (2011). Dietary omega-3 fatty acids and fish consumption and risk of type 2 diabetes. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 93(1), 143-150. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.005603>
12. Ebrahimi, M., Chaparabad, H. G., Al-Moussawi, I. S. M., Hosseini, M. H., & Mirghelenj, S. A. (2025). Thyme plant powder (*Thymus vulgaris*) improves the production performance of laying hens by affecting ovarian follicles. *Tropical Animal Science Journal*, 48(3), 231-240. <https://doi.org/10.5398/tasj.2025.48.3.231>
13. Ehr, I. J., Persia, M. E., & Bobeck, E. A. (2017). Comparative omega-3 fatty acid enrichment of egg yolks from first-cycle laying hens fed flaxseed oil or ground flaxseed. *Poultry Science*, 96(6), 1791-1799. <https://doi.org/10.3382/ps/pew462>
14. El-Moataaz, S., Ismael, H., & Aborhyem, S. (2019). Assessment of chemical composition of *Spirulina platensis* and its effect on fasting blood glucose and lipid profile in diabetic Rats. *Journal of High Institute of Public Health*, 49(3), 199-211. <https://dx.doi.org/10.21608/jhph.2019.64463>
15. El-Zenary, A. S., Elkin, R. G., & Harvatine, K. J. (2023). Comparison of Ahiflower oil containing stearidonic acid to a high-alpha-linolenic acid flaxseed oil at two dietary levels on omega-3 enrichment of egg yolk and tissues in laying hens. *Lipids*, 58(3), 139-155. <https://doi.org/10.1002/lipd.12370>
16. Fabro, C., Romanzin, A., & Spanghero, M. (2021). Fatty acid profile of table eggs from laying hens fed hempseed products: A meta-analysis. *Livestock Science*, 254, 104748. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104748>
17. Fernandes, R., Campos, J., Serra, M., Fidalgo, J., Almeida, H., Casas, A., & Barros, A. I. (2023). Exploring the benefits of phycocyanin: From *Spirulina* cultivation to its widespread applications. *Pharmaceuticals*, 16(4), 592-608. <https://doi.org/10.3390/ph16040592>
18. Gao, Z., Zhang, J., Li, F., Zheng, J., & Xu, G. (2021). Effect of oils in feed on the production performance and egg quality of laying hens. *Animals*, 11(12), 348-362. <https://doi.org/10.3390/ani11123482>
19. Gheorghe, A., Lefter, N. A., Idriceanu, L., Ropotă, M., & Hăbeanu, M. (2020). Effects of dietary extruded linseed and *Lactobacillus acidophilus* on growth performance, carcass traits, plasma lipoprotein response, and caecal bacterial populations in broiler chicks. *Italian Journal of Animal Science*, 19(1), 822-832. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1801359>
20. González-Ortiz, G., Sala, R., Cánovas, E., Abed, N., & Barroeta, A. C. (2013). Consumption of dietary n-3 fatty acids decreases fat deposition and adipocyte size, but increases oxidative susceptibility in broiler chickens. *Lipids*, 48, 705-717. <https://doi.org/10.1007/s11745-013-3785-3>
21. Hamard, A., Mazurais, D., Boudry, G., Le Huërou-Luron, I., Sève, B., & Le Floch, N. (2010). A moderate threonine deficiency affects gene expression profile, paracellular permeability and glucose absorption capacity in the ileum of piglets. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 21(10), 914-921. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2009.07.004>
22. Hy-Line International. (2020). Hy-Line W-36 Commercial Layers Management Guide.
23. Islam, F., Imran, A., Nosheen, F., Fatima, M., Arshad, M. U., Afzaal, M., Zahra, S. N., Segueni, N., & Amer Ali, Y. (2023). Functional roles and novel tools for improving-oxidative stability of polyunsaturated fatty acids: A comprehensive review. *Food Science & Nutrition*, 11(6), 2471-2482. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3272>
24. Jing, M., Zhao, S., & House, J. D. (2017). Performance and tissue fatty acid profile of broiler chickens and laying hens fed hemp oil and HempOmegaTM. *Poultry Science*, 96(6), 1809-1819. <https://doi.org/10.3382/ps/pew476>
25. Kim, J., Magnuson, A., Tao, L., Barcus, M., & Lei, X. G. (2016). Potential of combining flaxseed oil and microalgal biomass in producing eggs-enriched with n-3 fatty acids for meeting human needs. *Algal Research*, 17, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.005>
26. Kralik, G., Kralik, Z., Grčević, M., Galović, O., Hanžek, D., & Biazik, E. (2021). Fatty acid profile of eggs produced by laying hens fed diets containing different shares of fish oil. *Poultry Science*, 100(10), 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101379>
27. Kristensen, M., Bach Knudsen, K. E., Jørgensen, H., Oomah, D., Bügel, S., Toubro, S., & Astrup, A. (2013). Linseed dietary fibers reduce apparent digestibility of energy and fat and weight gain in growing rats. *Nutrients*, 5(8), 3287-3298. <https://doi.org/10.3390/nu5083287>
28. Lee, S. H., Kim, Y. B., Kim, D. H., Lee, D. W., Lee, H. G., Jha, R., & Lee, K. W. (2021). Dietary soluble flaxseed oils as a source of omega-3 polyunsaturated fatty acids for laying hens. *Poultry Science*, 100(8), 101276. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101276>
29. Li, S., Jing, M., Mohamed, N., Rey-Dubois, C., Zhao, S., Aukema, H. M., & House, J. D. (2023). The effect of increasing concentrations of omega-3 fatty acids from either flaxseed oil or preformed docosahexaenoic acid on fatty acid composition, plasma Oxylipin, and immune response of laying hens. *The Journal of Nutrition*, 153(7), 2105-2116. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.05.017>
30. Long, S., Liu, S., Wu, D., Mahfuz, S., & Piao, X. (2020). Effects of dietary fatty acids from different sources on growth performance, meat quality, muscle fatty acid deposition, and antioxidant capacity in broilers. *Animals*, 10(3), 508-21. <https://doi.org/10.3390/ani10030508>

31. Long, S. F., Kang, S., Wang, Q. Q., Xu, Y. T., Pan, L., Hu, J. X., & Piao, X. S. (2018). Dietary supplementation with DHA-rich microalgae improves performance, serum composition, carcass trait, antioxidant status, and fatty acid profile of broilers. *Poultry Science*, 97(6), 1881-1890. <https://doi.org/10.3382/ps/pey027>
32. Mirzaie, S., Zirak-Khattab, F., Hosseini, S. A., & Donyaie-Darian, H. (2017). Effects of dietary *Spirulina* on antioxidant status, lipid profile, immune response and performance characteristics of broiler chickens reared under high ambient temperature. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(4), 556-568. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0483>
33. Mosayyeb Zadeh, A., Mirghelenj, S. A., Hasanlou, P., & Shakouri Alishah, H. (2023). Effects of pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) supplementation on production performance, egg quality traits, and biochemical parameters of blood and egg in laying hens at later stages of the production period. *Veterinary Medicine and Science*, 9(1), 242-251. <https://doi.org/10.1002/vms3.1031>
34. Mousavi, A., Mahdavi, A. H., Riasi, A., & Soltani-Ghombavani, M. J. A. F. S. (2017). Synergetic effects of essential oils mixture improved egg quality traits, oxidative stability and liver health indices in laying hens fed fish oil. *Animal Feed Science and Technology*, 234, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.10.001>
35. Nampijja, Z., Kiggundu, M., Kigozi, A., Lugya, A., Magala, H., Ssepuuya, G., & Mugerwa, S. (2023). Optimal substitution of black soldier fly larvae for fish in broiler chicken diets. *Scientific African*, 20, e01636. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01636>
36. Neijat, M., Ojekudo, O., & House, J. D. (2016). Effect of flaxseed oil and microalgae DHA on the production performance, fatty acids and total lipids of egg yolk and plasma in laying hens. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 115, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2016.10.010>
37. Panaite, T. D., Cornescu, G. M., Predescu, N. C., Cismileanu, A., Turcu, R. P., Saracila, M., & Soica, C. (2023). Microalgae (*Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*) as a protein alternative and their effects on productive performances, blood parameters, protein digestibility, and nutritional value of laying hens' egg. *Applied Sciences*, 13(18), 51-67. <https://doi.org/10.3390/app131810451>
38. Rodriguez-Estrada, M. T., Paciulli, M., Cerretani, L., & Chiavaro, E. (2017). Production of vegetable oils from fruits, oilseeds, and beans: Conventional processing and industry techniques. *Edible Oils*, 3, 1-34. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315152493-2>
39. Sakai, C., Ishida, M., Ohba, H., Yamashita, H., Uchida, H., Yoshizumi, M., & Ishida, T. (2017). Fish oil omega-3 polyunsaturated fatty acids attenuate oxidative stress-induced DNA damage in vascular endothelial cells. *PLoS One*, 12(11), e0187934. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187934>
40. Salahuddin, M., Abdel-Wareth, A. A., Stamps, K. G., Gray, C. D., Aviña, A. M., Fulzele, S., & Lohakare, J. (2024). Enhancing laying hens' performance, egg quality, shelf life during storage, and blood biochemistry with *Spirulina platensis* supplementation. *Veterinary Sciences*, 11(8), 383-397. <https://doi.org/10.3390/vetsci11080383>
41. SAS, S. (2009). STAT User's Guide, Version 9.4. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
42. Schweitzer, G. G., Chen, Z., Gan, C., McCommis, K. S., Soufi, N., Chrast, R., & Finck, B. N. (2015). Liver-specific loss of lipin-1-mediated phosphatidic acid phosphatase activity does not mitigate intrahepatic TG accumulation in mice. *Journal of Lipid Research*, 56(4), 848-858. <https://doi.org/10.1194/jlr.m055962>
43. Sepehr, A., Kashani, R. B., Esmaeili, N., Safari, O., & Rombenso, A. (2021). Effects of extruded, milled, and whole flaxseed (*Linum usitatissimum*) on egg performance, lipid components, and fatty acids concentrations in yolk and blood, and antioxidant system of commercial laying hens. *Animal Feed Science and Technology*, 276, 114877. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114877>
44. Shahryari, M., Tabeidian, S. A., Shahraki, A. D. F., Tabatabaei, S. N., Toghyani, M., Forouzmand, M., & Habibiyan, M. (2021). Using soybean acid oil or its calcium salt as the energy source for broiler chickens: Effects on growth performance, carcass traits, intestinal morphology, nutrient digestibility, and immune responses. *Animal Feed Science and Technology*, 276, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114919>
45. Sidorkiewicz, M. (2024). The cardioprotective effects of polyunsaturated fatty acids depends on the balance between their anti-and pro-oxidative properties. *Nutrients*, 16(22), 3937. <https://doi.org/10.3390/nu16223937>
46. Vlaicu, P. A., Panaite, T. D., & Turcu, R. P. (2021). Enriching laying hens eggs by feeding diets with different fatty acid composition and antioxidants. *Scientific Reports*, 11(1), 20707. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-00343-1>
47. Vui, N. V., Oanh, D. H., Quyen, N. T. K., Linh, N. T., Nang, K., & Phong, N. H. (2024). The impact of adding spirulina algae to drinking water on the productivity, egg quality, yolk lipid oxidation, and blood biochemistry of laying hens. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 12(9), 1654-1663. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.aavs/2024/12.9.1654.1663>
48. Wang, C., Sun, C., Lu, W., Gul, K., Mata, A., & Fang, Y. (2020). Emulsion structure design for improving the oxidative stability of polyunsaturated fatty acids. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2955-2971. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12621>
49. Xu, M., Liu, L., Fan, Z., Niu, L., Ning, W., Cheng, H., Deng, H., Chen, W., & Che, L. (2025). Effect of different dietary oil sources on the performance, egg quality and antioxidant capacity during the late laying period. *Poultry*

Science, 104(1), 104615. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104615>

50. Zita, L., Okrouhlá, M., Krunt, O., Kraus, A., Stádník, L., Čítek, J., & Stupka, R. (2022). Changes in fatty acids profile, health indices, and physical characteristics of organic eggs from laying hens at the beginning of the first and second laying cycles. *Animals*, 12(1), 125. <https://doi.org/10.3390/ani12010125>