Vol 28, No. 2, Summer 2026

University of Tehran Press

Journal of Animal Production

Online ISSN: 2382-994X

Homepage: https://jap.ut.ac.ir/

Optimization of Functional and physiological responses of arian broiler chickens based on dietary ME, protein, lysine, and methionine +cysteine using Taguchi method

Mohammad Sedghi[1] ✉ | Zahra Sarrami[2] | Razie Ghasemi[3] | Mojtaba Abbasi[4] | Ishmael Mohammadi[5]

1. Corresponding Author, Department of Animal Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: mo.sedghi@iut.ac.ir
2. Department of Animal Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: zahra.sarrami@alumni.iut.ac.ir
3. Department of Animal Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: r.ghasemi1@alumni.iut.ac.ir
4. Department of Animal Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: mojtaba.abbasi96@alumni.iut.ac.ir
5. Department of Animal Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: esmail.mohammadi@ag.iut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 November 2025
Received in revised form
20 April 2026
Accepted 21 April 2026
Published online 30 June 2026

Keywords:
Nutrient optimization
Amino acid balance
Growth performance indices
Physiological response evaluation
Feed efficiency modeling

ABSTRACT

Objective: In recent years, the poultry industry has shown increasing interest in low-protein diets due to their economic and environmental benefits, including reduced feed costs and lower nitrogen excretion. However, reducing dietary protein levels may lead to deficiencies in essential amino acids. Therefore, extensive research over recent decades has focused on evaluating the relationships between dietary nutrients, production performance, and nutritional requirements of broiler chickens, particularly metabolizable energy, protein, and essential amino acids. The primary objective of these studies has been to provide more accurate estimations of nutritional requirements to maximize the genetic potential for growth and performance in poultry.

Method: To investigate the effects of dietary metabolizable energy, protein, methionine+ cysteine, and lysine levels on performance and physiological responses of Arian broiler chickens, a total of 2,160 one-day-old chicks (mixed sex) were used in a 4×4×4×4 factorial experiment with 16 treatments, 5 replicates per treatment, and 27 birds per replicate. Nutrient levels were formulated at 97, 100, 103, and 106% of the recommended requirements according to the Arian catalog. Performance parameters, including body weight gain, feed intake, and feed conversion ratio (FCR), were recorded. At 35 days of age, blood samples were collected from one bird per replicate for the serum biochemical parameters (cholesterol, triglycerides, HDL, LDL, albumin, globulin, ALP, AST, and ALT). Antibody titers against sheep red blood cells (SRBC) were measured at 28 and 35 days of age. At the end of the experimental period, five birds per treatment were slaughtered to determine carcass, liver, and lymphoid organ weights. Additionally, intestinal tissue samples were collected from one bird per replicate to evaluate micromorphological traits, including villus height and width, crypt depth, villus height to crypt depth ratio, and muscular layer thickness.

Results: The results of statistical analysis indicated that the optimal nutrient levels for maximizing daily weight gain over the entire rearing period were 103% of energy and lysine requirements, 106% of protein requirements, and the standard level of methionine+ cysteine. Standard levels of energy and protein, 97% of methionine +cysteine requirements, and 103% of lysine requirements were optimal for feed intake. Increasing dietary energy and protein levels improved the FCR and the European production efficiency index. Serum cholesterol and triglyceride concentrations increased with increasing dietary energy levels. Higher dietary energy with lower protein levels resulted in higher HDL concentrations. Higher levels of energy and protein elevated serum total protein, globulin, and the activities of AST and ALT enzymes. Moreover, dietary lysine level affected villus height and surface area.

Conclusion: Overall, the results of the present study indicate that feeding more than 103% of metabolizable energy required may have detrimental effects on performance and feed intake. Whereas, increasing dietary protein up to 106% of the requirement improved performance; but since there was no significant difference in performance at 103% and 106% protein levels, 103% protein is economically recommended. Furthermore, for optimal performance in Arian broiler chickens, the recommended standard level of methionine+ cysteine and 103% of lysine requirements are also suggested.

Cite this article: Sedghi, M., Sarrami, Z., Ghasemi, R., Abbasi, M., & Mohammadi, I. (2026). Optimization of Functional and physiological responses of arian broiler chickens based on dietary ME, protein, lysine, and methionine+ cysteine using Taguchi method. *Journal of Animal Production*, 28 (2), 215-232.
DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.406624.623880

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.406624.623880

دوره بیست و هشتم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

تولیدات دامی

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۲-۹۹۴x

Homepage: https://jap.ut.ac.ir/

بهینه‌سازی پاسخ‌های عملکردی و فیزیولوژیکی جوجه‌های گوشتی آرین براساس انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، لیزین و متیونین+ سیستئین جیره با روش تاگوچی

محمد صدقی[۱] ✉ | زهرا صرّامی[۲] | راضیه قاسمی[۳] | مجتبی عباسی[۴] | اسماعیل محمدی[۵]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mo.sedghi@iut.ac.ir
۲. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: zahra.sarrami@alumni.iut.ac.ir
۳. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: r.ghasemi1@alumni.iut.ac.ir
۴. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mojtaba.abbasi96@alumni.iut.ac.ir
۵. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: esmail.mohammadi@ag.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

کلیدواژه‌ها:
بهینه‌سازی مواد مغذی
تعادل اسیدهای آمینه
شاخص عملکرد رشد
ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیکی
مدل‌سازی کارایی خوراک

چکیده

هدف: صنعت طیور در سال‌های اخیر علاقه فزاینده‌ای به استفاده از جیره‌های کم‌پروتئین نشان داده است که این امر به‌دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، از جمله کاهش هزینه خوراک و کاهش کلی دفع نیتروژن می‌باشد. با این‌حال، کاهش سطح پروتئین جیره می‌تواند منجر به کاهش میزان اسیدهای آمینه ضروری گردد. از این‌رو، طی چندین دهه گذشته، پژوهش‌های گسترده‌ای به‌منظور بررسی رابطه بین مواد مغذی جیره، عملکرد تولیدی و برآورد نیازهای تغذیه‌ای در جوجه‌های گوشتی به‌ویژه در زمینه انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین و اسیدهای آمینه ضروری انجام شده است. هدف اصلی تمامی این مطالعات، ارائه برآوردهای دقیق‌تر از نیازهای تغذیه‌ای به‌منظور بیشینه‌سازی پتانسیل ژنتیکی رشد و عملکرد در طیور می‌باشد.

روش پژوهش: به‌منظور بررسی اثر سطوح انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، متیونین+ سیستئین و لیزین جیره بر عملکرد و پاسخ‌های فیزیولوژیک جوجه‌های آرین، تعداد ۲۱۶۰ قطعه جوجه (مخلوطی از نر و ماده) یک‌روزه در قالب آزمایش فاکتوریل ۴×۴×۴×۴ با ۱۶ تیمار و پنج تکرار و ۲۷ جوجه در هر تکرار مورداستفاده قرار گرفتند. سطوح مواد مغذی معادل ۹۷، ۱۰۰، ۱۰۳ و ۱۰۶ درصد نیاز توصیه‌شده در کاتالوگ آرین تنظیم شدند. شاخص‌های عملکردی از جمله افزایش وزن، مصرف خوراک و ضریب تبدیل خوراک برای صفر تا ۲۱ روز و ۲۲ تا ۴۲ روزگی اندازه‌گیری شد. به‌منظور ارزیابی فراسنجه‌های بیوشیمیایی خون در سن ۳۵ روزگی، از یک پرنده در هر تکرار خون‌گیری انجام شد. هم‌چنین جهت سنجش تیتر تولید آنتی‌بادی علیه گلبول قرمز گوسفندی، در سنین ۲۸ و ۳۵ روزگی نمونه خون گرفته شد. در پایان دوره، از هر تیمار پنج پرنده کشتار شد و نمونه‌برداری بافتی صورت گرفت. ویژگی‌های بافت‌شناسی شامل ارتفاع و عرض پرز، عمق کریپت، نسبت ارتفاع پرز به عمق کریپت و ضخامت لایه ماهیچه‌ای اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد سطوح بهینه مواد مغذی برای افزایش وزن روزانه در کل دوره پرورش، سطح ۱۰۳ درصد انرژی و لیزین، سطح ۱۰۶ درصد پروتئین و سطح استاندارد متیونین+ سیستئین بود. سطح استاندارد انرژی و پروتئین، سطح ۹۷ درصد نیاز متیونین+ سیستئین و سطح ۱۰۳ درصد نیاز لیزین، سطوح بهینه برای مصرف خوراک بود. با افزایش سطح انرژی و پروتئین جیره، ضریب تبدیل خوراک و شاخص عملکرد اروپایی بهبود یافت. غلظت کلسترول و تری‌گلیسرید خون پرندگان نیز با افزایش سطح انرژی جیره، روند افزایشی داشت. با افزایش انرژی و کاهش پروتئین جیره، غلظت پروتئین با چگالی بالا (HDL) روند افزایشی نشان داد. سطوح بالای انرژی و پروتئین سبب افزایش غلظت پروتئین، گلوبولین و آنزیم‌های کبدی در سرم خون شد. هم‌چنین ارتفاع و مساحت پرزهای روده با افزایش سطح اسیدآمینه لیزین روندی رو به افزایش داشت.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج حاصل، افزایش سطح انرژی قابل‌متابولیسم جیره به بیش از ۱۰۳ درصد نیاز ممکن است منجر به افت عملکرد و مصرف خوراک شود. افزایش سطح پروتئین تا ۱۰۶ درصد نیاز، نتایج عملکردی خوبی به‌همراه دارد و افزایش سطح پروتئین تا ۱۰۳ درصد نیاز از نظر اقتصادی توصیه می‌شود. هم‌چنین برای اسیدهای آمینه متیونین+ سیستئین و لیزین به‌ترتیب سطوح استاندارد و ۱۰۳ درصد نیاز توصیه می‌شود.

استناد: صدقی، محمد؛ صرّامی، زهرا؛ قاسمی، راضیه؛ عباسی، مجتبی و محمدی، اسماعیل (۱۴۰۵). بهینه‌سازی پاسخ‌های عملکردی و فیزیولوژیکی جوجه‌های گوشتی آرین براساس انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، لیزین و متیونین+ سیستئین جیره با روش تاگوچی. *نشریه تولیدات دامی*، ۲۸ (۲)، ۲۱۵-۲۳۲.
DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.406624.623880

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

انرژی و پروتئین از مواد مغذی مهمی هستند که بخش عمده‌ای از هزینه جیره پرندگان تجاری را تشکیل می‌دهند. تمام فعالیت‌های پرندگان از جمله تنفس، تپش قلب، گردش خون، حرکت ماهیچه‌ها، رشد و تولید محصولات به انرژی نیاز دارند و این انرژی به‌طورعمده از خوراک حاصل می‌شود. هم‌چنین پروتئین یک عنصر کلیدی در متابولیسم سلولی است که نقش مهمی در روند زندگی و بقا ایفا می‌کند (Niu *et al.*, 2009). طی ۵۰ سال گذشته برنامه‌های انتخاب ژنتیکی باعث افزایش نرخ رشد جوجه‌های گوشتی شده است. به‌همراه تغییرات ژنتیکی به‌وجودآمده در طی دهه‌های گذشته پژوهش‌های بسیاری در زمینه بیان بهتر ارتباط بین مواد مغذی جیره و عملکرد و هم‌چنین برآورد احتیاجات جوجه‌های گوشتی به‌ویژه در مورد انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین و اسیدهای آمینه ضروری انجام گرفته است.

هدف عمده تمام این پژوهش‌ها ارائه دقیق‌تر احتیاجات مواد مغذی بوده است تا بتوان از این راه به حداکثر ظرفیت ژنتیکی رشد و عملکرد پرنده رسید (Dairo *et al.*, 2010). رشد پرنده تابعی از دریافت مواد مغذی است و انتظار می‌رود که با افزایش تراکم مواد مغذی جیره، عملکرد پرنده نیز بهبود یابد. به‌عنوان مثال، Lamot (۲۰۱۷) نشان داد که افزایش تراکم مواد مغذی جیره باعث افزایش رشد و شاخص عملکرد اروپایی در جوجه‌های گوشتی می‌شود. اما باید توجه کرد که افزایش سطح مواد مغذی جیره تا سطح مشخصی باعث بهبود رشد می‌شود و از یک نقطه به بعد افزایش تراکم مواد مغذی ممکن است بر عملکرد پرنده بی‌اثر و یا دارای اثر منفی باشد. این امر به دو دلیل اتفاق می‌افتد، اول آن‌که پتانسیل ژنتیکی پرنده تا میزان مشخصی از رشد را پاسخگو است و پس از آن دریافت انرژی و پروتئین بیش‌تر به رشد پرنده کمک نخواهد کرد. هم‌چنین پرنده میزان خوراک مصرفی خود را به نحوی تنظیم می‌کند که روزانه دریافت نسبتاً ثابتی از انرژی و سایر مواد مغذی داشته باشد، به‌عبارت دیگر، پرنده خوراک مصرفی روزانه خود را براساس انرژی جیره تنظیم می‌کند (Aftab, 2019).

بنابراین، پیداکردن نقطه بهینه برای تأمین سطوح موردنیاز مواد مغذی در پرندگان یک امر ضروری برای دست‌یابی به جیره‌های اقتصادی با حداکثر ظرفیت رشد پرنده است. تاکنون مطالعات بسیار متعددی به‌منظور برآورد احتیاجات انرژی، پروتئین و اسیدهای آمینه ضروری موردنیاز سویه های تجاری وارداتی جوجه‌های گوشتی انجام شده است، اما در مورد سطح نیاز انرژی، پروتئین و اسیدهای آمینه سویه تجاری آرین اطلاعات دقیقی در دسترس نیست. هم‌چنین تا کنون تأثیر استفاده همزمان از سطوح مختلف انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، اسیدهای آمینه متیونین+ سیستئین و لیزین جهت بهینه‌سازی عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین موردارزیابی دقیق قرار نگرفته است.

روش آماری تاگوچی یک روش پیشنهادی برای کاهش تعداد تیمارها در آزمایش‌های فاکتوریل است که اولین‌بار توسط جنیچی تاگوچی در سال ۱۹۴۰ مطرح شد. این روش می‌تواند تعداد تیمارها را در آزمایش‌های فاکتوریل کاهش دهد و با روش‌های آماری سطوح بهینه را برای هر متغیر به‌دست آورد. امروزه از این روش در طرح‌های مربوط به پرندگان نیز استفاده می‌شود (Sedghi *et al.*, 2014). به‌عنوان مثال، پژوهش‌گرانی با استفاده از آرایه متعامد L_9 تاگوچی سطوح بهینه انرژی، متیونین+سیستئین و لیزین را در جیره بلدرچین‌های ژاپنی مشخص کردند (Ansaripoor *et al.*, 2020). در مطالعه حاضر نیز به‌منظور کاهش تعداد تیمارها و هم‌چنین یافتن سطوح بهینه انرژی، پروتئین، متیونین+ سیستئین و لیزین از روش تاگوچی استفاده شد. بنابراین، این پژوهش با هدف برآورد سطوح بهینه انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین خام، متیونین+ سیستئین و لیزین موردنیاز در دوره‌های مختلف پرورش جوجه‌های گوشتی آرین با استفاده از روش آماری تاگوچی، به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد رشد، ویژگی‌های لاشه، شاخص‌های خونی، پاسخ ایمنی و مورفولوژی روده انجام شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

مطالعه حاضر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد در این پژوهش برای بررسی اثر چهار سطح انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین جیره بر عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین، تعداد ۲۱۶۰ قطعه جوجه گوشتی (مخلوطی از نر و ماده) یک روزه سویه آرین با روش تاگوچی ۴×۴×۴×۴ با ۱۶ تیمار، پنج تکرار و در هر تکرار ۲۷ جوجه پرورش داده شد. تعداد ۱۶ تیمار گزارش‌شده در جدول (۱) از بین ۲۵۶ تیمار و براساس آرایه متعامد L16 تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار Minitab انتخاب شدند. سطوح انتخابی انرژی قابل‌متابولیسم، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین به نحوی انتخاب شدند که برای همه مواد مغذی ذکرشده ۹۷، ۱۰۰، ۱۰۳ و ۱۰۶ درصد نیاز توصیه‌شده در کاتالوگ آرین را پوشش دهند (جدول ۱). برنامه‌های روشنایی و مدیریت سالن مطابق توصیه آرین صورت گرفت. هم‌چنین آب و خوراک به‌صورت آزاد در اختیار جوجه‌ها قرار گرفت.

جدول ۱. تیمارهای آزمایشی به‌دست آمده از روش تاگوچی L_{16}

تیمارها	انرژی قابل‌متابولیسم	پروتئین خام	متیونین+سیستئین	لیزین
۱	۹۷ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد
۲	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد
۳	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد
۴	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد
۵	۱۰۰ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد
۶	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد
۷	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد
۸	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد
۹	۱۰۳ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد
۱۰	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد
۱۱	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد
۱۲	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد
۱۳	۱۰۶ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد
۱۴	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد
۱۵	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد	۱۰۰ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد
۱۶	۱۰۶ درصد استاندارد	۱۰۶ درصد استاندارد	۹۷ درصد استاندارد	۱۰۳ درصد استاندارد

۲. ۱. پارامترهای عملکردی

داده‌های عملکرد شامل مصرف خوراک روزانه، افزایش وزن روزانه و ضریب تبدیل غذایی در پایان هر هفته اندازه‌گیری شد و برای دوره‌های صفر تا ۲۱ روزگی و ۲۲ تا ۴۲ روزگی تجزیه و گزارش شد. ضریب تبدیل خوراک به‌صورت نسبت مصرف خوراک روزانه به افزایش وزن روزانه محاسبه شد. میزان مرگ‌ومیر در هر گروه آزمایشی برای اصلاح داده‌های عملکردی ثبت شد، اما به‌دلیل معنادارنبودن، گزارش نشد.

۲. ۲. پارامترهای بیوشیمیایی خون

جهت بررسی پارامترهای بیوشیمیایی خون از جمله غلظت آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز (ALP)،آسپاراتات‌آمینوترانسفراز (AST)، آلانین آمینوترانسفراز (ALT)، کلسترول، تری‌گلسیرید، پروتئین با چگالی بالا (HDL)، پروتئین با چگالی پایین

(LDL)، آلبومین و گلوبولین در سرم خون پرندگان، در سن ۳۵ روزگی، از یک پرنده در هر تکرار خون‌گیری و سرم آن‌ها در سانتریفیوژ با دور ۲۵۰۰ و به‌مدت ۱۰ دقیقه جداسازی شد. نمونه‌های سرم تا روز آزمایش در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. تمامی پارامترهای بیوشیمیایی خون توسط کیت‌های تجاری (پارس آزمون) و با استفاده از دستگاه اتوآنالایزر (Alcyon, American) اندازه‌گیری شد (Gupta *et al*., 2005).

۲. ۳. مورفولوژی روده

در پایان آزمایش، یک پرنده از هر تکرار ذبح و یک قطعهٔ یک سانتی‌متری از قسمت میانی ژژنوم جدا شد. نمونه‌ها در فرمالین ۱۰ درصد ثابت شدند و مراحل آماده‌سازی جهت برش و رنگ‌آمیزی مطابق روش‌های استاندارد انجام شد (Ekim *et al*., 2020). به‌طور خلاصه، نمونه‌ها ابتدا در پارافین ثابت شدند و توسط دستگاه میکروتوم برش‌هایی با ضخامت ۵ میکرومتر از آن‌ها تهیه شد. سپس با هماتوکسیلین- ائوزین رنگ‌آمیزی شدند. از اسلایدهای تهیه‌شده توسط میکروسکوپ نوری (Olympus CX31, Tokyo) عکس‌برداری شد و سپس توسط نرم‌افزار ImageJ ارتفاع پرز، عرض پرز، عمق کریپت، نسبت ارتفاع پرز به عمق کریپ و ضخامت لایه ماهیچه‌ای اندازه‌گیری شد. هم‌چنین سطح جذب از طریق رابطه (۱) به‌دست آمد (Prakatur *et al*., 2019).

$$VSA= \pi \times VH \times VW$$ رابطه ۱)

که در این رابطه، VSA، سطح جذب؛ VH، ارتفاع پرز و VW، عرض پرز می‌باشد.

۲. ۴. تیتر آنتی‌بادی تولید شده علیه گلبول قرمز گوسفندی

به‌منظور ارزیابی پتانسیل تولید آنتی‌بادی علیه گلبول قرمز گوسفندی (SRBC)، به ۱۵ پرنده از هر تیمار در ۲۱ و ۲۸روزگی ۰/۵ سی‌سی سوسپانسیون پنج درصد SRBC درون رگ تزریق شد و نمونه‌های خون در هفت و ۱۴ روز بعد از اولین تزریق جمع‌آوری شدند. سپس سرم آن‌ها جداسازی شد و تا زمان آزمایش در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در زمان انجام آزمایش، سرم نمونه‌ها به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۶ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس آنتی‌بادی کل، حساس به مرکاپتواتانول (ایمونوگلوبین G، IgG) و مقاوم در برابر مرکاپتواتانول (ایمونوگلوبین M، IgM) به‌روش سنجش هماگلوتیناسیون و براساس دستورالعمل‌های ارائه‌شده اندازه‌گیری شدند (Akhlaghi *et al*., 2013).

۲. ۵. آنالیز آماری

داده های به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر با استفاده از آرایه متعامد L16 تاگوچی و براساس تعداد متغیرها و سطوح آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab تجزیه و تحلیل شد. یک مرحله مهم در تجزیه و تحلیل طرح‌های تاگوچی، تعیین سطح بهینه هر متغیر است. برای این منظور مقادیر به‌دست آمده از هر سطح یک متغیر به نسبت درستی عملکرد به خطا (signal to noise ratio; S/N) تبدیل می‌شود. از رابطه (۲) برای یافتن S/N برای متغیرهایی که بالاترین سطح آن‌ها، سطح بهینه هستند (مانند افزایش وزن روزانه، شاخص عملکرد و ...) استفاده شد:

$$S/N=-10Log\left[1/n\sum_{i=0}^{n}1/yi^{2}\right]$$ رابطه ۲)

که در این رابطه، S/N، نسبت درستی عملکرد به خطا؛ n، تعداد تکرارها و yi، مقدار مشاهده شده و یا مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر پاسخ در مشاهده iام می‌باشد.

برای یافتن سطوح بهینه برای پارامترهایی که کم‌ترین سطح آن‌ها، سطح بهینه است (مانند ضریب تبدیل خوراک، ضریب تغییرات و ...) نیز از رابطه (۳) برای یافتن S/N استفاده شد:

رابطه ۳) $S/N=-10Log\left[1/n\sum_{i=0}^{n} yi^2\right]$

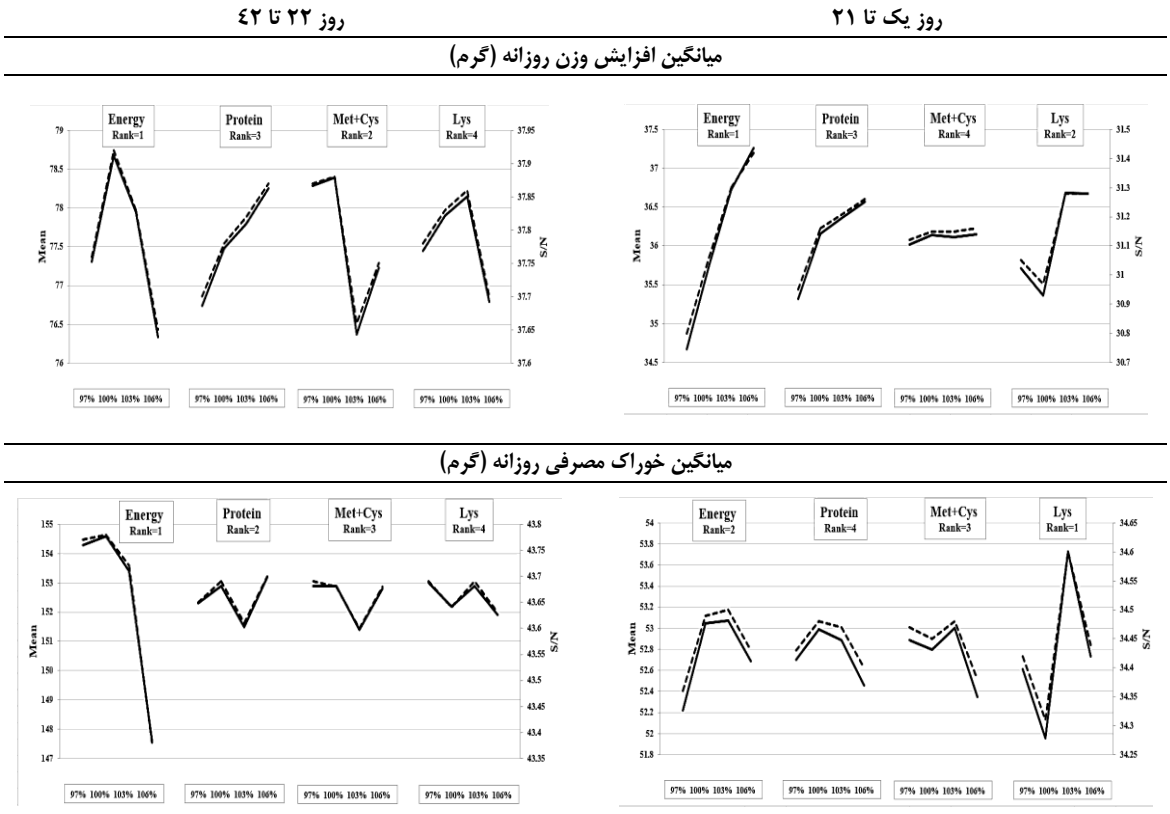
که در این رابطه، S/N، نسبت درستی عملکرد به خطا؛ n، تعداد تکرارها و yi، مقدار مشاهده‌شده و یا مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر پاسخ در مشاهده iام می‌باشد.

هم‌چنین در تجزیه داده‌های آزمایشی به‌روش تاگوچی، هر متغیر (انرژی، پروتئین، متیونین و لیزین) برای هر پارامتر (پارامترهای عملکردی و فیزیولوژیکی) به‌دست‌آمده رتبه‌بندی می‌شود. رتبه نشان‌دهنده تأثیر هر متغیر بر تغییرات آن پارامتر است. به‌عنوان مثال، اگر انرژی بیش‌ترین تأثیر را بر تغییرات خوراک مصرفی داشته باشد، انرژی در رتبه یک قرار می‌گیرد، سپس بسته به اثربخشی بقیه متغیرها، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین در رتبه‌های دو، سه و چهار قرار می‌گیرند.

۳. یافته‌های پژوهش

۳. ۱. عملکرد رشد

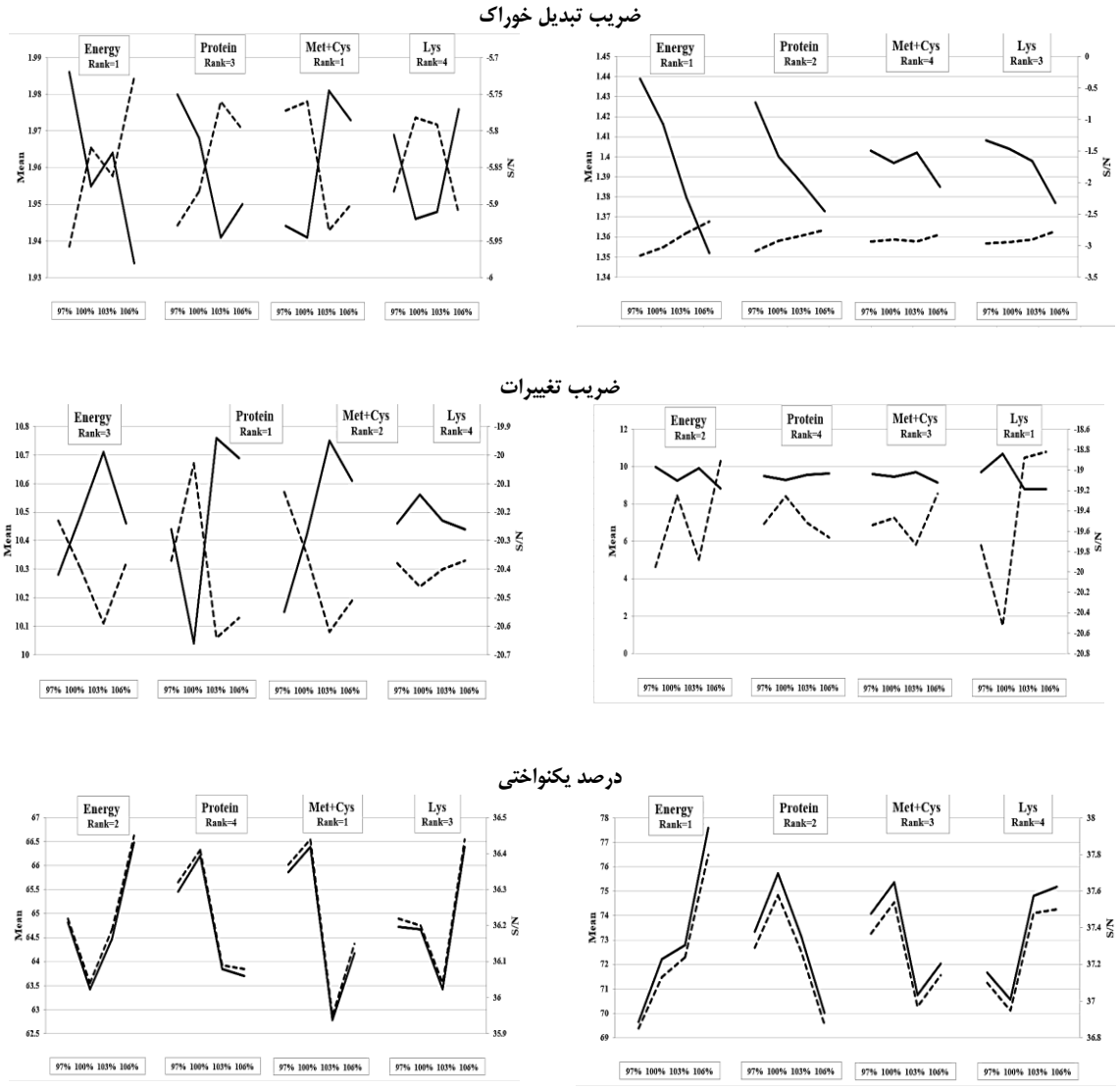
نتایج مربوط به پارامترهای عملکردی که با استفاده از روش تاگوچی برای تعیین سطح بهینه مواد مغذی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین بر عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین

خطوط نقطه‌چین - - - - - - : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ——— : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.



ادامه شکل ۱. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین بر عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین

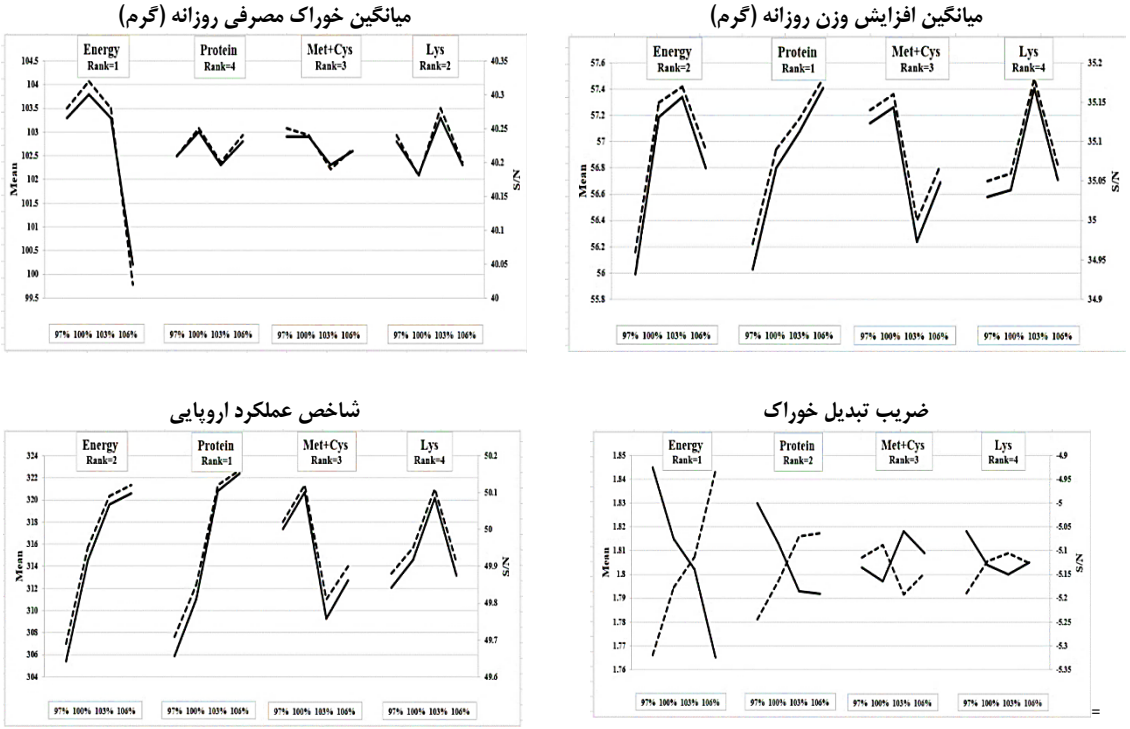
خطوط نقطه‌چین ------ : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ——— : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

افزایش وزن روزانه و ضریب تبدیل خوراک در دوره ابتدایی (یک تا ۲۱ روزگی) با افزایش انرژی و پروتئین خام به‌صورت خطی بهبود یافت، اما در دوره انتهایی آزمایش افزایش ۱۰۶ درصدی انرژی باعث افت وزن و افزایش ضریب تبدیل شده بود که میتواند به‌دلیل افت مصرف خوراک در این دوره باشد. در دوره ابتدایی سطح متیونین و سیستئین تأثیر چشم‌گیری بر افزایش وزن و مصرف خوراک نداشت، اما افزایش درصد لیزین باعث افزایش خطی وزن بدن شده بود. افزایش سطوح اسیدهای آمینه در ابتدای دوره پرورشی باعث بهبود ضریب تبدیل خوراک شد، اما در دوره انتهایی پرورش باعث افزایش ضریب تبدیل شد که احتمالاً به‌دلیل افت مصرف خوراک بوده است.

نتایج مربوط به پارامترهای عملکردی در کل دوره پرورش در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج برآورد

می‌شود که سطوح بهینه مواد مغذی برای افزایش وزن روزانه در کل دوره پرورش، سطح ۱۰۳ درصد نیاز انرژی و لیزین، سطح ۱۰۶ درصد نیاز پروتئین و سطح استاندارد متیونین+سیستئین بود. هم‌چنین سطح استاندارد انرژی و پروتئین، سطح ۹۷ درصد نیاز متیونین+ سیستئین و سطح ۱۰۳ درصد نیاز لیزین، سطوح بهینه برای مصرف خوراک در کل دوره پرورش بود. با افزایش سطح انرژی و پروتئین جیره از ۹۷ درصد نیاز به ۱۰۶ درصد نیاز، ضریب تبدیل خوراک و شاخص عملکرد اروپایی بهبود یافت. اگرچه سطح استاندارد متیونین+ سیستئین و سطح ۱۰۳ درصد نیاز لیزین، سطوح بهینه برای ضریب تبدیل خوراک و شاخص عملکرد اروپایی در کل دوره پرورش بودند. در کل دروه پرورش بیش‌ترین اثر بخشی برای افزایش وزن روزانه و شاخص عملکرد اروپایی مربوط به سطح پروتئین جیره و برای خوراک مصرفی و ضریب تبدیل خوراک مربوط به سطح انرژی جیره بود (رتبه یک).



شکل ۲. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین بر عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین در کل دوره پرورش

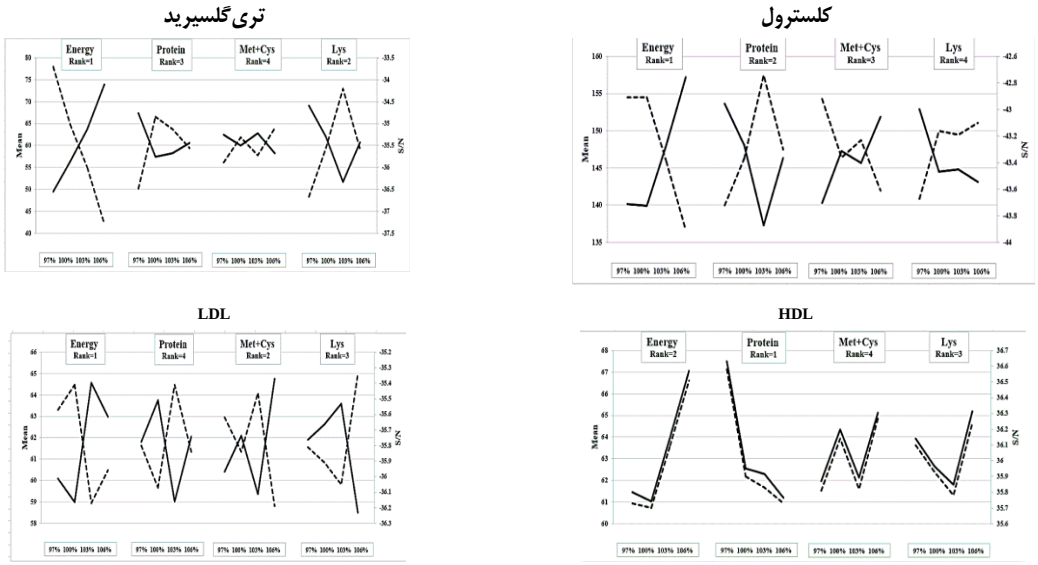
خطوط نقطه‌چین - - - - - - : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ——— : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۳. ۲. پارامترهای بیوشیمیایی خون

۳. ۲. ۱. پروفایل چربی خون

نتایج مربوط به پروفایل چربی در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی جیره باعث افزایش غلظت کلسترول، تری‌گلیسرید و LDL و HDL شده است و هم‌چنین بیش‌ترین اثربخشی را داشته است. تغییرات اسیدآمینه‌های لیزین و متیونین+ سیستئین اثرات مشخصی بر پروفایل چربی خون نداشت، اما افزایش سطح پروتئین جیره تا حدودی غلظت این پارامترهای بیوشیمیایی خون را کاهش داده است.



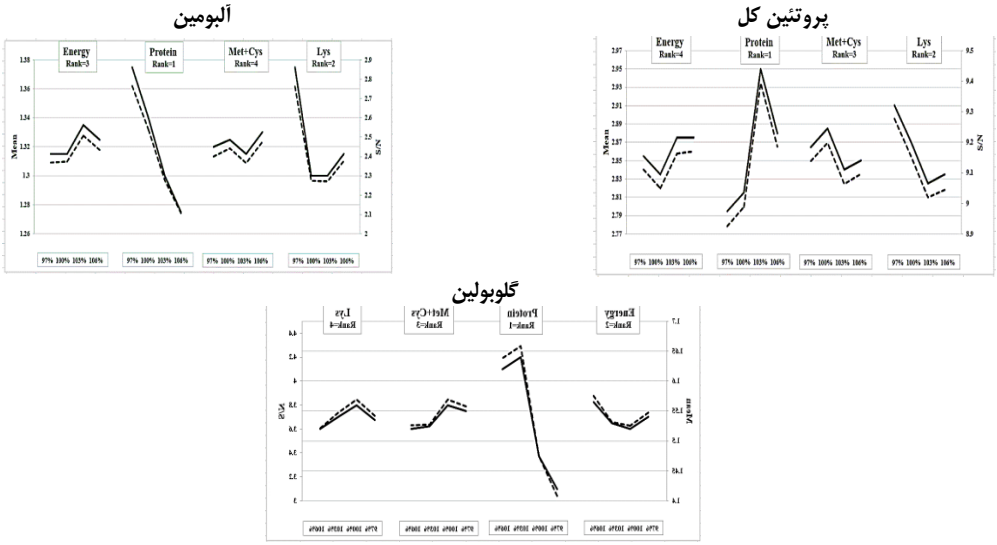
شکل ۳. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین بر پروفایل چربی خون در جوجه‌های گوشتی آرین (میلی‌گرم/دسی‌لیتر)

خطوط نقطه‌چین ـــــــ : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ـــــــ : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۳. ۲. ۲. پروفایل پروتئینی خون

نتایج مربوط به پروفایل پروتئینی خون در شکل (۴) ارائه شده است. همانگونه که از نتایج برآورد می‌شود، افزایش سطح پروتئین جیره باعث افزایش غلظت گلوبولین و کاهش غلظت آلبومین در سرم خون شد، اما به‌طورکلی بیش‌ترین غلظت پروتئین کل خون در سطح ۱۰۳ درصد نیاز پروتئین در جیره مشاهده شد. بیش‌ترین اثر بخشی در پروفایل پروتئینی خون، مربوط به سطح پروتئین جیره بود (رتبه یک) و تغییرات سطح انرژی و متیونین+سیستئین جیره تأثیرات محسوسی بر غلظت پروتئین، آلبومین و گلوبولین در خون نداشت. هم‌چنین افزایش سطح لیزین در جیره باعث کاهش غلظت پروتئین و آلبومین در خون شد.



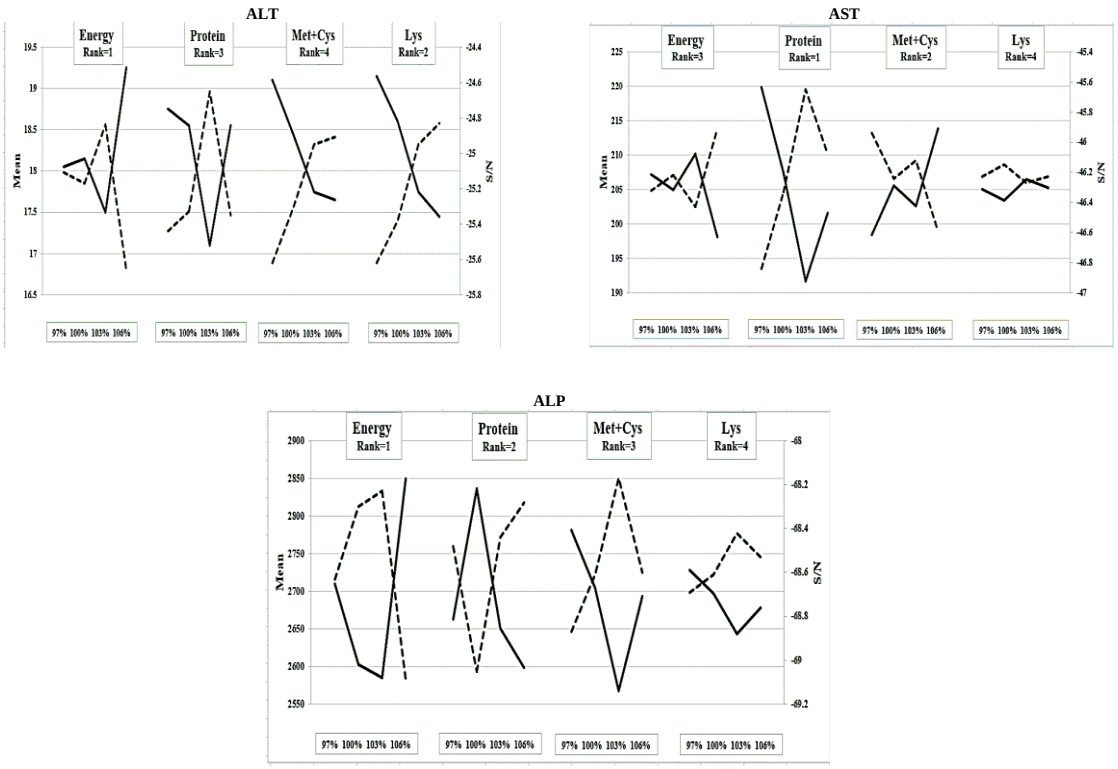
شکل ٤. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+ سیستئین و لیزین بر پروفایل پروتئینی خون جوجه‌های گوشتی آرین (گرم/ دسی‌لیتر)

خطوط نقطه‌چین ـــــــ : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ـــــــ : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۳. ۲. ۳. آنزیم‌های کبدی خون

نتایج مربوط به آنزیم‌های کبدی در شکل (۵) ارائه شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، افزایش سطح انرژی جیره باعث افزایش غلظت آنزیم‌های ALT و ALP و کاهش غلظت آنزیم AST شد. هم‌چنین افزایش سطح پروتئین جیره باعث کاهش سطح آنزیم‌های AST و ALP و آنزیم AST در سطح ۱۰۳ درصد نیاز شد. افزایش لیزین و متیونین+ سیستئین جیره منجر به کاهش غلظت آنزیم ALT در خون شد، اما بر غلظت سایر آنزیم‌ها تأثیر مشخصی نداشت.



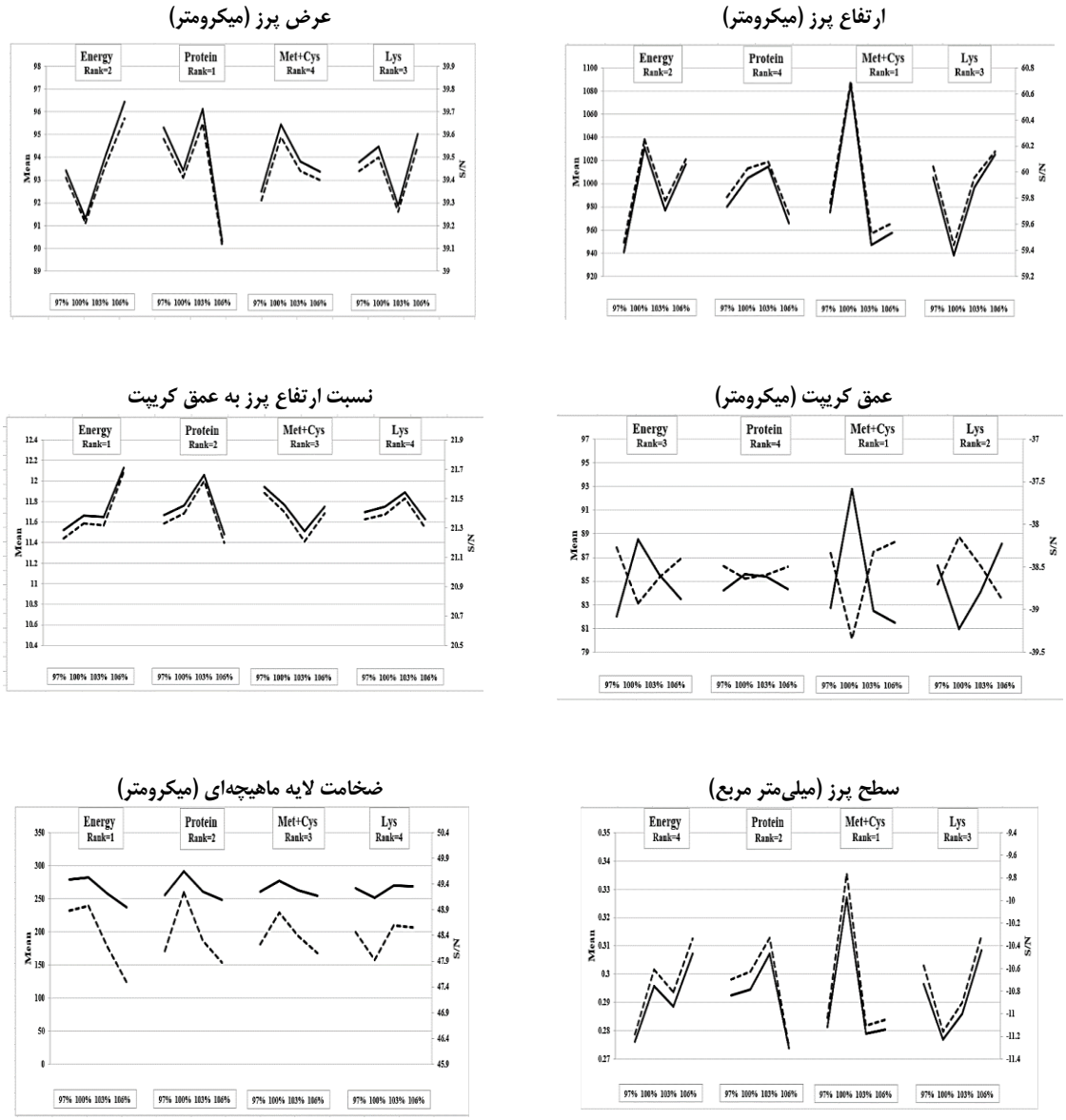
شکل ۵. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+سیستئین و لیزین بر آنزیم‌های کبدی در جوجه‌های گوشتی آرین (واحد/لیتر)

خطوط نقطه‌چین - - - - - - : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ——— : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۳. ۳. تغییرات مورفولوژی ژژنوم

نتایج مربوط به تغییرات مورفولوژی ژژنوم در شکل (۶) ارائه شده است. همانگونه که از نتایج برآورد می‌شود، سطح ۱۰۳ درصد نیاز پروتئین، سطح استاندارد متیونین+سیستئین و سطح ۱۰۶ درصد نیاز لیزین، سطوح بهینه برای ارتفاع پرز، عرض پرز و سطح پرز بودند. اگرچه سطح بهینه انرژی برای ارتفاع پرز، سطح استاندارد و برای عرض پرز و سطح پرز، سطح ۱۰۶ درصد نیاز بود. سطوح بهینه مواد مغذی برای عمق کریپت، سطح ۹۷ درصد نیاز انرژی و پروتئین، سطح ۱۰۶ درصد نیاز متیونین+سیستئین و سطح استاندارد لیزین بود. سطوح بهینه مواد مغذی برای نسبت ارتفاع پرز به عمق کریپت، سطح ۱۰۶ درصد نیاز انرژی، سطح ۱۰۳ درصد نیاز پروتئین و لیزین و سطح ۹۷ درصد نیاز متیونین+ سیستئین بود. با افزایش سطح انرژی از ۹۷ درصد به ۱۰۶ درصد نیاز، نسبت ارتفاع پرز به عمق کریپت افزایش یافت.



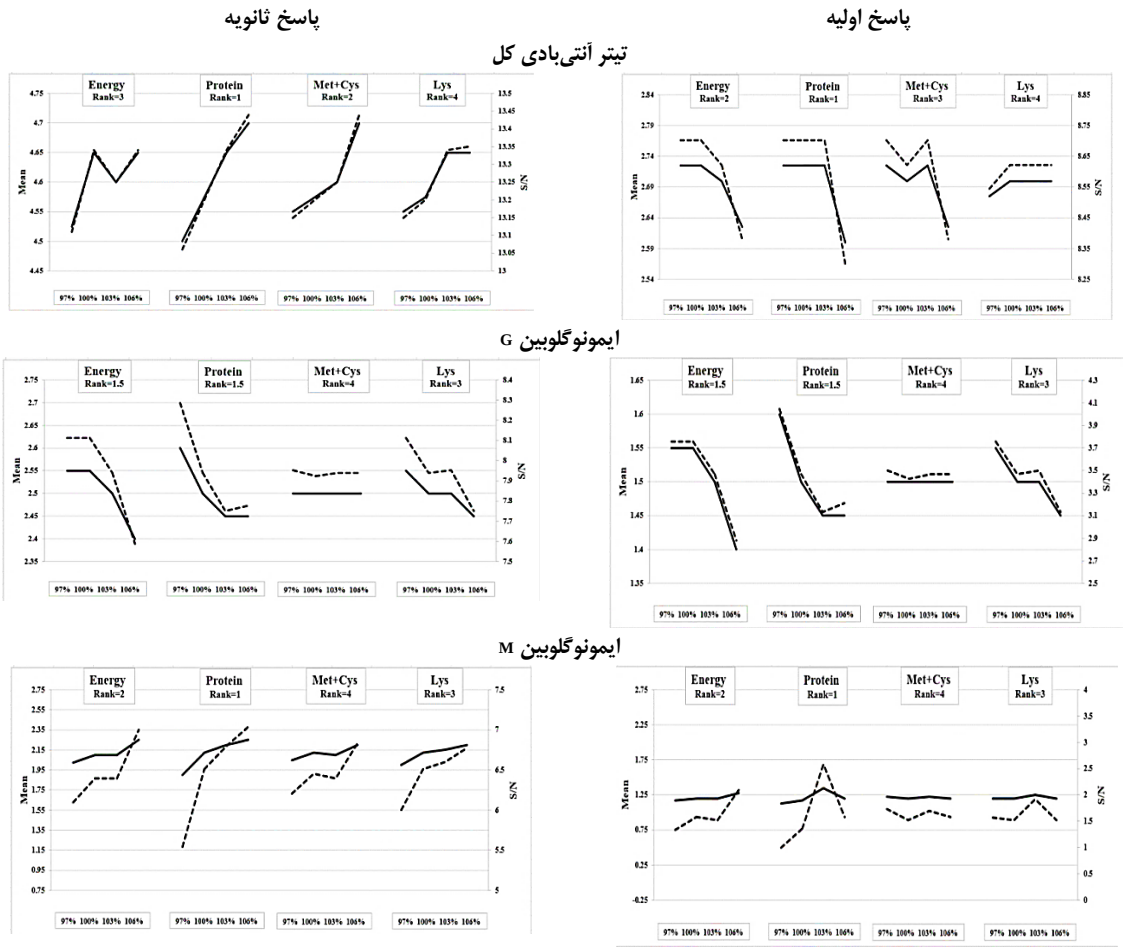
شکل ٦. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+ سیستئین و لیزین بر تغییرات مورفولوژی ژژنوم در جوجه‌های گوشتی آرین

خطوط نقطه‌چین - - - - - - : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ——— : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۳. ۴. آنتی‌بادی تولیدشده علیه SRBC

نتایج مربوط به تیتر آنتی‌بادی تولیدشده علیه SRBC در شکل (۷) ارائه شده است. تیتر آنتی‌بادی کل تولیدشده علیه SRBC در پاسخ اولیه در نتیجه افزایش سطح پروتئین و انرژی جیره کاهش یافت، اما در پاسخ طولانی‌مدت (ثانویه) تیتر آنتی‌بادی کل و IgM در نتیجه افزایش سطح پروتئین و انرژی جیره افزایش یافت. هم‌چنین تیتر IgG در پاسخ اولیه و ثانویه در نتیجه افزایش سطح پروتئین و انرژی جیره روندی رو به کاهش داشت.



شکل ۷. تأثیر سطوح مختلف انرژی، پروتئین، متیونین+ سیستئین و لیزین بر تیتر آنتی‌بادی تولیدشده علیه گلبول قرمز گوسفندی (Log 2)

خطوط نقطه‌چین ▬ ▬ ▬ : نسبت درستی عملکرد به خطا (S/N) خطوط ممتد ▬▬▬ : میانگین تیمارها

رتبه یک تا چهار: میزان اثربخشی ماده مغذی بر پارامتر مورد نظر؛ رتبه یک بیش‌ترین اثر بخشی و رتبه چهار کم‌ترین اثر بخشی را نشان می‌دهد.

۴. بحث

خوراک‌دهی و فرمولاسیون جیره نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد و بهره‌وری اقتصادی طیور دارد. تعیین سطح بهینه مواد مغذی، به‌ویژه انرژی و پروتئین، برای استفاده مناسب از پتانسیل ژنتیکی پرنده و کاهش هزینه‌های خوراک ضروری است (نیکخواه، ۱۳۶۸). در طول دوره پرورش، با افزایش سن پرنده، نیاز انرژی برای نگهداری و رشد افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان نیاز پروتئین روندی نسبتاً ثابت یا کاهشی دارد (Rose & Kyriazakis, 1991). بنابراین، کاهش تدریجی پروتئین و افزایش انرژی جیره در مراحل پایانی پرورش، روشی متداول در صنعت طیور است.

مطالعات نشان داده‌اند که جوجه‌ها می‌توانند نیازهای متغیر خود را با تنظیم مصرف خوراک جبران کنند (Fosoul *et al.*, 2016). هم‌چنین گزارش شده است که انرژی، نخستین عامل محدودکننده در جیره‌های طیور گوشتی بوده و تغییرات آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر مصرف خوراک و کارایی تبدیل مواد مغذی اثرگذار باشد (Leeson & Summers, 2001). در این پژوهش نیز افزایش انرژی جیره موجب کاهش خوراک مصرفی شد که با مطالعات پیشین مبنی بر افزایش مصرف خوراک در جیره‌های کم‌انرژی (Leeson *et al.*, 1996) و کاهش مصرف در جیره‌های پرانرژی (Leterrier *et al.*, 2006)

مطابقت دارد. در مقابل، تغییر سطح پروتئین خام بر مصرف خوراک اثر معنی‌داری نداشت که احتمالاً ناشی از حفظ تعادل اسیدهای آمینه است (Tasaki & Yanaka, 1981). با وجود کاهش خوراک مصرفی در پرندگانی که سطح انرژی جیره آن‌ها سه درصد بیش‌تر از نیاز توصیه‌شده بود، افزایش وزن روزانه و ضریب تبدیل خوراک در این گروه مشابه یا حتی بهتر از گروه شاهد مشاهده شد که بیانگر دریافت مقادیر مشابه انرژی و پروتئین در بین گروه‌هاست که با یافته‌های Bouvarelو همکاران (۲۰۰۸) نیز مطابقت دارد. در رتبه‌بندی عوامل، پس از انرژی، پروتئین خام و متیونین+سیستئین بیش‌ترین اثر را بر پاسخ‌ها نشان دادند. این یافته با مطالعاتی که نشان داده‌اند در صورت تأمین متعادل اسیدهای آمینه ضروری، کاهش ملایم سطح پروتئین خام بدون افت عملکرد امکان‌پذیر است، مطابقت دارد (Cordero *et al*., 2025). از سوی دیگر، نقش متیونین و سیستئین به‌عنوان اسیدهای آمینه محدودکننده اولیه در جیره‌های مبتنی بر ذرت و کنجاله سویا، به‌ویژه در بهبود ضریب تبدیل خوراک و شاخص‌های لاشه، به‌طور گسترده گزارش شده است (Alabi *et al*., 2025). در مورد لیزین، اگرچه رتبه اثرگذاری آن در مقایسه با سایر عوامل پایین‌تر بود، اما پاسخ‌های مشاهده‌شده نشان می‌دهد که تنظیم دقیق سطح لیزین در نزدیکی مقدار بهینه می‌تواند به بهبود رشد و کارایی کمک کند. افزایش سطح لیزین می‌تواند اثرات مثبتی بر رشد داشته باشد، به‌طوری‌که گزارش شده است که ۱۰ درصد افزایش لیزین موجب بهبود رشد و سلامت جوجه‌ها می‌شود (Mousa *et al*., 2023). از سوی دیگر مطالعات متعددی تأکید کرده‌اند که پاسخ جوجه‌های گوشتی به لیزین معمولاً به‌صورت افزایشی تا رسیدن به سطح اشباع ظاهر می‌شود و پس از آن تغییرات پاسخ محدودتر خواهد بود (Dozier *et al*., 2008) و این موضوع می‌تواند توضیح‌دهنده شدت اثر کم‌تر لیزین در دامنه سطوح موردبررسی حاضر باشد. نکته قابل‌توجه این است که هم‌راستایی روند تغییرات میانگین پاسخ‌ها و نسبت سیگنال به نویز در اغلب شاخص‌ها نشان‌دهنده پایداری پاسخ‌ها و غالب‌بودن اثرات اصلی عوامل در محدوده سطوح انتخاب شده است. در مطالعات مبتنی بر روش تاگوچی در سیستم‌های زیستی نیز گزارش شده است، زمانی‌که دامنه عوامل به‌درستی و براساس ملاحظات بیولوژیکی انتخاب شود، اثرات اصلی بیش‌ترین سهم را در تغییرات پاسخ داشته و تعاملات دوگانه معمولاً شدت کم‌تری از خود نشان می‌دهند (Roy, 2010). بر این اساس، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش تاگوچی توانسته است به‌طور مؤثر عوامل کلیدی تغذیه‌ای مؤثر بر عملکرد جوجه‌های گوشتی آرین را در کل دوره پرورش شناسایی کند.

غلظت تری‌گلیسیرید، کلسترول، HDL و LDL در سرم خون از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی متابولیسم لیپیدها محسوب می‌شوند (Helkin *et al*., 2016). به‌طور کلی، جیره‌هایی با نسبت انرژی به پروتئین بالاتر موجب افزایش فرایند لیپوژنز در بدن طیور می‌گردند (Rosebrough & Steele, 1985). در مطالعه حاضر، افزایش انرژی جیره موجب افزایش غلظت سرمی تری‌گلیسیرید، کلسترول و HDL شد که با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد (Ge *et al*., 2019; Hu *et al*., 2021). افزایش سطوح مواد مغذی، به‌ویژه انرژی، معمولاً با افزایش HDL خون همراه است (Siri-Tarino, 2011). HDL مسئول انتقال تری‌گلیسیرید از خون به بافت‌های بدن و بازگشت آن به کبد است (Kwiterovich Jr, 2000). هم‌چنین، HDL با جذب کلسترول از بافت‌های محیطی و انتقال آن به کبد، نقش مهمی در تنظیم تعادل چربی دارد، درحالی‌که LDL عملکردی معکوس ایفا می‌کند (Miller & Miller, 1975). از سوی دیگر، پیشنهاد شده است پرندگانی که با جیره‌های کم‌پروتئین تغذیه می‌شوند، تمایل دارند از کربوهیدرات‌ها به‌عنوان منبع اصلی انرژی استفاده کنند، که این امر به افزایش سطح تری‌گلیسیرید پلاسما منجر می‌شود (Kamran *et al*., 2010). این پدیده می‌تواند توضیح‌دهنده افزایش تری‌گلیسیرید سرم در پرندگان تغذیه‌شده با جیره‌های کم‌پروتئین در مطالعه حاضر باشد.

کبد نقش اصلی در متابولیسم انرژی و پروتئین و کاتابولیسم لیزین دارد (Khwatenge *et al*., 2020). افزایش ALT، AST وALP در سرم نشان‌دهنده آسیب کبدی است (Sarrami *et al*., 2023; Raghebian *et al*., 2017).

مطالعات نشان داده‌اند جیره‌های کم‌پروتئین می‌توانند فشار بر کبد را افزایش داده و موجب آسیب‌های کبدی شود. این موضوع با افزایش سطح ALT و ALP سرم تأیید می‌شود (Sigolo *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021). هم‌چنین مطابق با یافته‌های ما گزارش شده است که افزایش لیزین جیره بیش از ۱۰ درصد سطح توصیه‌شده موجب افزایش AST شده است (Mousa *et al.*, 2023). یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد افزایش سطح پروتئین و اسیدهای آمینه تا حدود شش درصد بالاتر از نیاز جوجه‌های نژاد آرین، اثر منفی قابل‌توجهی بر کبد ندارد. با این‌حال، افزایش سطح انرژی جیره می‌تواند فشار بر کبد را افزایش داده و موجب آسیب‌های کبدی شود. این موضوع با افزایش سطح ALT و ALP سرم تأیید می‌شود. کاهش سطح انرژی جیره نیز موجب کاهش غلظت آنزیم‌های کبدی در پلاسما شده است (Raghebian *et al.*, 2017)، درحالی‌که برخی پژوهش‌ها تفاوت معناداری در سطح ALT سرم در اثر محدودیت خوراک یا تغییر انرژی جیره مشاهده نکرده‌اند (Rajman *et al.*, 2006). این اختلاف نتایج می‌تواند به تفاوت در نژاد پرندگان و منابع انرژی جیره مرتبط باشد.

غلظت پروتئین کل و آلبومین سرم نیز بازتابی از سنتز پروتئین در کبد و وضعیت فیزیولوژیکی و رشد جوجه‌هاست (Limdi & Hyde, 2003). غلظت پروتئین و آلبومین خون با سطح AST و ALT سرم، پروفایل لیپید خون و هم‌چنین با شدت لیپیدوز کبدی ارتباط نزدیکی دارند (Zhang *et al.*, 2021). افزایش این پروتئین‌ها معمولاً با بهبود قابلیت هضم پروتئین و افزایش دسترسی به پیش‌سازهای اسید آمینه برای سنتز پروتئین مرتبط است (Prola *et al*., 2013). هم‌چنین گزارش شده است که جیره‌های پرانرژی موجب افزایش غلظت سرمی پروتئین کل و آلبومین در جوجه‌های گوشتی می‌شوند (Hu *et al*., 2021).

تنوع در محتوای پروتئین و انرژی جیره می‌تواند موجب تغییر در مورفولوژی و روده شود (Incharoen *et al*., 2010). در راستای یافته‌های مطالعه حاضر، گزارش شده است که کاهش سطح انرژی جیره موجب کاهش ارتفاع پرز و نسبت ارتفاع پرز به عمق کریپت می‌شود (Houshmand *et al*., 2011). عمیق‌شدن کریپت نیز نشان‌دهنده افزایش نیاز به انرژی برای بازسازی بافت است (Choct, 2009). از این‌رو، کاهش عمق کریپت در پاسخ به سطوح مختلف انرژی می‌تواند مکانیسمی برای صرفه‌جویی انرژی باشد (Fosoul *et al*., 2016). پروتئین نیز در توسعه ساختار روده نقش مهمی دارد (Maneewan & Yamauchi, 2005) و دریافت جیره کم‌پروتئین موجب افزایش سطح جذب، به‌عنوان مکانیسم جبرانی می‌شود (Incharoen *et al*., 2010). این تفسیر با نتایج مطالعه حاضر نیز هماهنگ است، زیرا در جیره‌های کم‌پروتئین، افزایش مساحت پرزهای روده مشاهده شد. هم‌چنین افزایش سطح لیزین و متیونین جیره، رشد پرزهای روده را بهبود می‌دهد (Shazali *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2019). این امر حاکی از آن است که افزایش اسیدهای آمینه قادر است کمبود پروتئین خام جیره را تا حد مشخصی جبران کند.

به‌طور کلی، وضعیت ایمنی حیوانات تحت تأثیر انرژی و پروتئین قرار می‌گیرد (Kidd, 2004; Klasing, 2007). کاهش سطوح انرژی و پروتئین جیره در این پژوهش موجب کاهش تیتر آنتی‌بادی کل و IgM در پاسخ ثانویه به SRBC شد. با این‌حال، برخی یافته‌ها گزارش کرده‌اند جیره‌های کم‌انرژی موجب افزایش پاسخ اولیه علیه SRBC می‌شوند (Golian *et al*., 2010) و انرژی بالاتر تأثیری ندارد (Praharaj *et al*., 1999). هم‌چنین بیان شده است که سطح لیزین نیز اثر معنی‌داری بر تیتر SRBC نداشته است (Ghoreyshi *et al*., 2019).

وزن اندام‌های لنفاوی نیز به‌عنوان شاخصی از وضعیت ایمنی جوجه‌های گوشتی شناخته می‌شود. اندازه و وزن بورس فابریسیوس اطلاعات ارزشمندی درباره بلوغ و تکامل سیستم ایمنی ارائه می‌کند، زیرا این اندام محل اصلی بلوغ لنفوسیت‌های B و T است (Grasman, 2002). معمولاً زمانی که وزن بورس فابریسیوس حدود دو درصد وزن بدن باشد، عملکرد سیستم ایمنی مطلوب در نظر گرفته می‌شود (Sellaoui *et al*., 2012). تیموس نیز به‌عنوان مکان بلوغ

لنفوسیت‌های T نقش مهمی ایفا می‌کند. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد محدودیت‌های شدید یا طولانی‌مدت خوراک می‌تواند عملکرد سیستم ایمنی را کاهش داده و وزن نسبی اندام‌های لنفاوی را کم کند. با این‌حال، مشابه نتایج برخی پژوهش‌ها، در این مطالعه نیز وزن نسبی اندام‌های لنفاوی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار نگرفت (Fosoul *et al*., 2016).

۵. نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل، افزایش سطح انرژی قابل‌متابولیسم جیره به بیش از ۱۰۳ درصد نیاز می‌تواند موجب افت عملکرد و کاهش مصرف خوراک شود. افزایش سطح پروتئین جیره تا ۱۰۶ درصد نیاز، هرچند ممکن است موجب افزایش وزن‌گیری پرنده شود، اما از نظر اقتصادی سطح ۱۰۳ درصد پروتئین به‌عنوان گزینه مناسب‌تر پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، برای اسیدهای آمینه متیونین+ سیستئین و لیزین، به‌ترتیب استفاده از سطح استاندارد و سطح ۱۰۳ درصد نیاز توصیه‌شده در کاتالوگ نژاد آرین برای جوجه‌های گوشتی پیشنهاد می‌شود.

۶. ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آن‌هاست.

۷. مشارکت نویسندگان

محمد صدقی: مشارکت در طراحی پژوهش، مشاوره و نظارت بر انجام پژوهش و ویرایش مقاله؛
زهرا صرامی: اجرای پژوهش، انجام آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تهیه پیش‌نویس مقاله؛
راضیه قاسمی: اجرای پژوهش، انجام آزمایش‌ها و تهیه پیش‌نویس مقاله؛
مجتبی عباسی: اجرای پژوهش و انجام آزمایش‌ها؛
اسماعیل محمدی: اجرای پژوهش و انجام آزمایش‌ها.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. حامی مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه صنعتی اصفهان و ستاد توسعه زیست‌فناوری مرغ آرین انجام شده است.

۱۰. تشکر و قدردانی

از ستاد توسعه زیست‌فناوری مرغ آرین و دانشگاه صنعتی اصفهان که حمایت مالی و معنوی این پژوهش را به عهده داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۱۱. منابع

نیک‌خواه، علی و کاظمی شیرازی، رضا (۱۳۶۸)، روش علمی تغذیه مرغ، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

Aftab, U. (2019). Energy and amino acid requirements of broiler chickens: keeping pace with the enetic progress. *World's Poultry Science Journal*, *75*(4), 507-514. https://doi.org/10.1017/S0043933919000564.

Akhlaghi, A., Zamiri, M. J., Ahangari, Y. J., Atashi, H., Pirsaraei, Z. A., Deldar, H., ... & Hashemi, S. R. (2013). Oral exposure of broiler breeder hens to extra thyroxine modulates early adaptive immune responses in progeny chicks. *Poultry Science*, *92*(4), 1040-1049. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02545.

Alabi, T., & Adedokun, S. (2025). Amino Acid Nutrition in Poultry: A Review. *Animals* , *15*: 3323. https://doi.org/10.3390/ani15223323.

Ansaripoor, A., Sedghi, M., Sadeghi-Sefidmazgi, A., & Pilevar, M. (2020). Optimization of growth performance responses of Japanese quail with different concentrations of metabolizable energy, lysine, and sulfur amino acids using Taguchi method. *Livestock Science*, *241*, 104234. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104234.

Bouvarel, I., Chagneau, A. M., Lescoat, P., Tesseraud, S., & Leterrier, C. (2008). Forty-eight-hour cycle sequential feeding with diets varying in protein and energy contents: adaptation in broilers at different ages. *Poultry Science*, *87*(1), 196-203. https://doi.org/10.3382/ps.2007-00205.

Choct, M. (2009). Managing gut health through nutrition. *British Poultry Science*, *50*: 9-15. https://doi.org/10.1080/00071660802538632.

Cordero, P., Ramírez-Toloza, G., Dufflocq, P., Herrera-Alcaíno, S., & Guzmán-Pino, S.A. (2025). Reduced Dietary Protein and Essential Amino Acids Impair Growth Performance and Increase Lysine Sensitivity in Broiler Chickens. *Animals*, *15*, 1027. https://doi.org/10.3390/ani15071027.

Dairo, F. A. S., Adesehinwa, A. O. K., Oluwasola, T. A., & Oluyemi, J. A. (2010). High and low dietary energy and protein levels for broiler chickens. *African Journal of Agricultural Research*, *5*, 2030-38. doi: 10.5897/AJAR10.254.

Dozier, W. A. Corzo, A., Kidd, M. T., & Schilling, M. W. (2008). Dietary digestible lysine requirements of male and female broilers from forty-nine to sixty-three days of age. *Poultry Science Journal, 87*, 1385-91. doi: 10.3382/ps.2007-00529. PMID: 18577620.

Ekim, B., Calik, A., Ceylan, A., & Saçaklı, P. (2020). Effects of Paenibacillus xylanexedens on growth performance, intestinal histomorphology, intestinal microflora, and immune response in broiler chickens challenged with Escherichia coli K88. *Poultry Science*, *99*, 214-23. https://doi.org/10.3382/ps/pez460.

Fosoul, S. S., Ale Saheb, M., Toghyani, A., Gheisari, S. A., Tabeidiyan, M., Rzaei, M., & Azarfar, A. (2016). Performance, immunity, and physiological responses of broilers to dietary energy and protein sequential variations. *Poultry Science*, *95*, 2068-80. https://doi.org/10.3382/ps/pew084.

Ge, X. K., Wang, A. A., Ying, Z. X., Zhang, L. G., Su, W. P., Cheng, K., Feng, C. C., Zhou, Y. M., Zhang, L. L., & Wang, T. J. P. S. (2019). Effects of diets with different energy and bile acids levels on growth performance and lipid metabolism in broilers. *Poultry Science*, *98*, 887-95. https://doi.org/10.3382/ps/pey434.

Ghoreyshi, S. M., Omri, B., Chalghoumi, R., Bouyeh, M., Seidavi, A., Dadashbeiki, M., Lucarini, M., Durazzo, A., van den Hoven, R., & Santini, A. (2019). Effects of dietary supplementation of l-carnitine and excess lysine-methionine on growth performance, carcass characteristics, and immunity markers of broiler chicken. *Animals*, *9*, 362. https://doi.org/10.3390/ani9060362.

Golian, A., Azghadi, A., & Pilevar, M. (2010). Influence of various levels of energy and protein on performance and humoral immune responses in broiler chicks. *Global Veterinaria*, *4*, 434-40.

Grasman, K. A. (2002). Assessing immunological function in toxicological studies of avian wildlife. *Integrative and Comparative Biology*, *42*, 34-42. https://doi.org/10.1093/icb/42.1.34.

Gupta, S. Jindal, N., Khokhar, R. S., Gupta, A. K., Ledoux, D. R., & Rottinghaus, G. E. (2005). Effect of ochratoxin A on broiler chicks challenged with Salmonella gallinarum. *British Poultry Science*, *46*, 443-50. https://doi.org/10.1080/00071660500190850.

Helkin, A., Stein, J. J., Lin, S., Siddiqui, S., Maier, K. G., & Gahtan, V. (2016). Dyslipidemia part 1-review of lipid metabolism and vascular cell physiology. *Vascular and Endovascular Surgery*, *50*, 107-18. https://doi.org/10.1177/1538574416628654.

Houshmand, M., Azhar, K., Zulkifli, I., Bejo, M. H., & Kamyab, A. (2011). Effects of nonantibiotic feed additives on performance, nutrient retention, gut pH, and intestinal morphology of broilers fed different levels of energy. *Journal of Applied Poultry Research*, *20*, 121-28. https://doi.org/10.3382/japr.2010-00171.

Hu, X., Li, X., Xiao, C., Kong, L., Zhu, Q., & Song, Z. (2021). Effects of dietary energy level on performance, plasma parameters, and central AMPK levels in stressed broilers. *Frontiers in Veterinary Science*, *8*, 681858. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.681858.

Incharoen, T., Yamauchi, K., Erikawa, T., & Gotoh, H. (2010). Histology of intestinal villi and epithelial cells in chickens fed low-crude protein or low-crude fat diets. *Italian Journal of Animal Science*, *9*, e82. https://doi.org/10.4081/ijas.2010.e82.

Kamran, Z., Sarwar, M., Nisa, M. U., Nadeem, M. A., & Mahmood, S. (2010). Effect of low levels of dietary crude protein with constant metabolizable energy on nitrogen excretion, litter composition and blood parameters of broilers. *International Journal of Agriculture and Biology*, *12*, 401-05.

Khwatenge, C. N., Kimathi, B. M., & Nahashon, S. N. (2020). Transcriptome analysis and expression of selected cationic amino acid transporters in the liver of broiler chicken fed diets with varying concentrations of lysine. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*, 5594. https://doi.org/10.3390/ijms21165594.

Kidd, M. T. (2004). Nutritional modulation of immune function in broilers. *Poultry Science*, *83*, 650-57. https://doi.org/10.1093/ps/83.4.650.

Klasing, K. C. (2007). Nutrition and the immune system. *British Poultry Science*, *48*, 525-37. https://doi.org/10.1080/00071660701671336.

Kwiterovich Jr, P. O. (2000). The metabolic pathways of high-density lipoprotein, low-density lipoprotein, and triglycerides: a current review. *The American Journal of Cardiology*, *86*, 5-10. https://doi.org/10.1016/S0002-9149(00)01461-2.

Lamot, D. (2017). First week nutrition for broiler chickens: effects on growth, metabolic status, organ development, and carcass composition. *Wageningen University and Research*.

Leeson, S. U. O. G., Caston, L., & Summers, J. D. (1996). Broiler response to energy or energy and protein dilution in the finisher diet. *Poultry Science*, *75*, 522-28. https://doi.org/10.3382/ps.0750522.

Leeson, S. (2001). Summers. JD (2001) Nutrition of the chicken. *University books, Guelph*.

Leterrier, C., Perrot, P., Favreau, F., Constantin, P., Bouvarel, I., Lessire, M., & Picard, M. (2006). Sequential feeding with low-and high-lysine diets increases activity and improves gait score in broiler chickens. *Researchgate Net*.

Leterrier, C., Vallée, C., Constantin, P., Chagneau, A. M., Lessire, M., Lescoat, P., & Berri, C., Baéza, E., Bizeray, D., & Bouvarel, I. (2008). Sequential feeding with variations in energy and protein levels improves gait score in meat-type chickens. *Animal*, *2*, 1658-65. https://doi.org/10.1017/S1751731108002875.

Limdi, J. K., & Hyde, G. M. (2003). Evaluation of abnormal liver function tests. *Postgraduate Medical Journal*, *79*, 307-12. https://doi.org/10.1136/pmj.79.932.307.

Maneewan, B., & Yamauchi, K. (2005). Recovery of duodenal villi and cells in chickens refed protein, carbohydrate and fat. *British Poultry Science*, *46*, 415-23. https://doi.org/10.1080/00071660500158105.

Miller, G. J., & Miller, N. E. (1975). Plasma-high-density-lipoprotein concentration and development of ischaemic heart-disease. *The Lancet*, *305*, 16-19. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(75)92376-4.

Mousa, M. A., Asman, A. S., Ali, R. M. J., Sayed, R. K. A., Majrashi, K. A., Fakiha, K. G., Alhotan, R. A., & Selim, S. (2023). Impacts of dietary lysine and crude protein on performance, hepatic and renal functions, biochemical parameters, and histomorphology of small intestine, liver, and kidney in broiler chickens. *Veterinary Sciences*, *10*, 98. https://doi.org/10.3390/vetsci10020098.

Niu, Z., Shi, J., Liu, F., Wang, X., Gao, C., & Yao, L. (2009). Effects of dietary energy and protein on growth performance and carcass quality of broilers during starter phase. *International Journal of Poultry Science*, *8*, 508-11.

Praharaj, N. K., Reddy, M. R., RamaRao, S. V., Shyamsunder, G., & Reddy, B. L. N. (1999). Energy by sire family interactions for growth, feed efficiency, immune competence in commercial broilers. *Archiv für Geflügelkunde*, *63*, 82-86.

Prakatur, I., Miskulin, M., Pavic, M., Marjanovic, K., Blazicevic, V., Miskulin, I., & Domacinovic, M. (2019). Intestinal morphology in broiler chickens supplemented with propolis and bee pollen, *Animals*, *9*, 301. https://doi.org/10.3390/ani9060301.

Prola, L., Nery, J., Lauwaerts, A., Bianchi, C., Sterpone, L., Marco, M., Pozzo, L., & Schiavone, A. (2013). Effects of N, N-dimethylglycine sodium salt on apparent digestibility, vitamin E absorption, and serum proteins in broiler chickens fed a high-or low-fat diet. *Poultry Science*, *92*, 1221-26. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02465.

Raghebian, M., Sadeghi, A. A., & Aminafshar, M. (2017). Impact of dietary energy density on the liver health of broilers exposed to heat stress and their performance during finisher period. *Journal of Livestock Science*, *8*, 122-30.

Rajman, M., Juráni, M., Lamošová, D., Máčajová, M., Sedlačková, M., Košťál, L., Ježová, D., & Výboh, P. (2006). The effects of feed restriction on plasma biochemistry in growing meat type chickens (*Gallus gallus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, *145*, 363-71. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.07.004.

Rose, S. P., & Kyriazakis, I. (1991). Diet selection of pigs and poultry. *Proceedings of the Nutrition Society*, *50*, 87-98. https://doi.org/10.1079/PNS19910014.

Rosebrough, R. W., & Steele, N. C. (1985). Energy and protein relationships in the broiler: 1. Effect of protein levels and feeding regimens on growth, body composition, and in vitro lipogenesis of broiler chicks. *Poultry Science*, *64*, 119-26. https://doi.org/10.3382/ps.0640119.

Roy, R.K., (2010). A primer on the Taguchi method. *Society of manufacturing engineers*.

Sarrami, Z., Sedghi, M., Mohammadi, I., Bedford, M., Miranzadeh, H., & Ghasemi, R. (2023). Effects of bacteriophage on *Salmonella* Enteritidis infection in broilers. *Scientific Reports*, *13*, 12198. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38791-6.

Sedghi, M., Golian, A., Esmaeilipour, O., & Van Krimpen, M. M. (2014). Application of the Taguchi method in poultry science: estimation of the in vitro optimum intrinsic phytase activity of rye, wheat and barley. *British Poultry Science*, *55*, 246-52. https://doi.org/10.1080/00071668.2014.883460.

Sellaoui, S., Alloui, N., Mehenaoui, S., & Djaaba, S. (2012). Evaluation of immune status of the chicken using morphometry and histology of the bursa of fabricius. *Journal of Advanced Veterinary*, *2*, 440-43.

Shazali, N., Loh, T. C., Foo, H. L., & Samsudin, A. A. (2019). Gut microflora and intestinal morphology changes of broiler chickens fed reducing dietary protein supplemented with lysine, methionine, and threonine in tropical environment. *Revista Brasileira de Zootecnia*, *48*, e20170265. https://doi.org/10.1590/rbz4820170265.

Sigolo, S., Zohrabi, Z., Gallo, A., Seidavi, A., & Prandini, A. (2017). Effect of a low crude protein diet supplemented with different levels of threonine on growth performance, carcass traits, blood parameters, and immune responses of growing broilers. *Poultry Science*, *96*, 2751-60. https://doi.org/10.3382/ps/pex086.

Siri-Tarino, P. W. (2011). Effects of diet on high-density lipoprotein cholesterol. *Current Atherosclerosis Reports*, *13*, 453-60. https://doi.org/10.1007/s11883-011-0207-y.

Tasaki, I., & Yanaka, M. (1981) Effect of dietary sulfur amino acids deficiency on the energy metabolism in the chick. *Japanese Journal of Zootechnical Science*, *51*, 632-637.

Zhang, Y. N., Wang, S., Deng, Y. Z., Huang, X. B., Li, K. C., Chen, W., Ruan, D., Xia, W. G., Wang, S. L., & Zheng, C. T. (2021). The application of reduced dietary crude protein levels supplemented with additional amino acids in laying ducks. *Poultry Science*, *100*, 100983. https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.01.006.

Zhang, Y. N., Xu, R. S., Min, L., Ruan, D., Kim, H. Y., Hong, Y. G., Chen, W., Wang, S., Xia, W. G., & Luo, X. (2019). Effects of L-methionine on growth performance, carcass quality, feather traits, and small intestinal morphology of Pekin ducks compared with conventional DL-methionine. *Poultry Science*, *98*, 6866-72. https://doi.org/10.3382/ps/pez438.