Animal Production Research

Vol. 15, No. 1, 2026 (71-88)
doi: 10.22124/ar.2025.29573.1878
eISSN: 2538-6107 pISSN: 2252-0872

University of Guilan

RESEARCH PAPER **OPEN ACCESS**

Effect of broiler raw feather processing on ruminal degradability parameters and digestibility index in AFRC and NorFor systems

H. Nouri[1]*, A. Teimouri Yansari[1], Y. Chashnidel[1]

1. Department of Animal and Poultry Nutrition, Animal Sciences Faculty, Sari Agricultural and Natural Resources University, Sari, Iran

(Received: 15-01-2025 – Revised: 20-05-2025 – Accepted: 22-05-2025 – Available online: 22-05-2025)

Abstract

Introduction: Rising prices for common protein supplements and the limitation of protein sources and as a result, the increase in production costs have created interest in new and cheaper protein sources for livestock. Livestock and poultry industries produce large amounts of protein by-products that can be processed for ruminant feed. Among animal by-products, feathers are produced as a waste by-product in large quantities in poultry slaughterhouses. Unprocessed feather has a low digestibility of about 5.8%, so it needs to be processed as a source of protein. Steam hydrolysis is the most common processing method used in the industry to convert raw feathers into feather meal. Feather processing in Iran is usually done at a pressure of 200 to 300 kPa. Due to the type of processing, feathers are not processed well. In this way, processing at different temperatures and using chemical reducing agents along with proteases during processing to improve the quality of the final product is an option that deserves further investigation. Therefore, the present study aimed to determine the effect of broiler raw feather processing on dry matter and crude protein ruminal degradability.

Materials and methods: This research was carried out in a 2×2×2 factorial arrangement based on a completely randomized design with eight treatments and five replications including: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes with 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure with 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes with 0.25% sodium metabisulfite and 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes with 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure with 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes with 0.25% sodium metabisulfite and 0.15% of protease enzyme. Protein fractions were determined using the Agricultural and Food Research Council equations, as well as degradability parameters using the NorFor method. Ruminal degradability and effective degradability parameters of dry matter and crude protein were determined by rumen incubation at different incubation times inside the rumen of three Zel sheep with rumen fistula.

Results and discussion: The study of dry matter degradability data shows that there was a statistically significant difference between the rapidly degradable and the potentially degradable fractions, as well as the constant rate (P<0.05), however, there was no statistically significant difference among the slowly degradable fractions. The effective degradability was statistically significant at the rate of 2, 5, and 8% per hour in the experimental treatments (P<0.05). The results of the ruminal degradability of crude protein showed that there was a statistically significant difference between the rapidly degradable and potentially degradable fractions, as well as the constant rate of crude protein degradation (P<0.05), however, there was no statistically significant difference among the

* Corresponding author: hosein_nouri90@yahoo.com

CC BY

slowly degradable fractions. The effective degradability of crude protein was statistically significant at the passage rate of 2, 5, and 8% per hour in experimental treatments (P<0.05). So that, the raw feathers processing increased the rapidly degradable fraction, the potentially degradable fraction, the constant rate of dry matter, and crude protein degradation, and also the effective degradability at the passage rates of 2, 5, and 8% per hour.
Conclusions: According to the results of this research, it can be seen that the use of sodium metabisulfite for the processing of raw feathers increased the rapidly degradable, potentially degradable fraction, and the constant rate, and also the effective degradability in the passage rate of 2 and 5% per hour of dry matter and crude protein. Also, the processing of raw feathers with protease enzyme increased the rapidly degradable part, potentially degradable fraction, constant rate, and effective degradability in the passage rate of 5 and 8% per hour of dry matter and crude protein.
Keywords: Protease enzyme, Degradability, Feather meal, Processing, Digestibility
Ethics statement: This study was conducted with the full consideration of animal welfare and the approval of this study was granted by the Ethics Committee of Sari Agricultural and Natural Resources University.
Data availability statement: The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author.
Conflicts of interest: The authors declare no conflicts of interest.
Funding: The authors received no specific funding for this project.

How to cite this article:

Nouri, H., Teimouri Yansari, A., & Chashnidel, Y. (2026). Effect of broiler raw feather processing on ruminal degradability parameters and digestibility index in AFRC and NorFor systems. *Animal Production Research*, *15*(1), 71-88. doi: 10.22124/ar.2025.29573.1878

تحقیقات تولیدات دامی

سال پانزدهم/شماره اول/بهار ۱۴۰۵ (۸۸-۷۱)

Animal Production Research

دانشگاه گیلان

مقاله پژوهشی

اثر فرآوری پر خام مرغ گوشتی بر فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای و شاخص هضم‌پذیری در سامانه‌های AFRC و NorFor

حسینعلی نوری[1*]، اسداله تیموری یانسری[1]، یداله چاشنی دل[1]

۱- گروه تغذیه دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶ – تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰ – تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ – تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱)

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، تعیین اثر نوع فرآوری پر خام مرغ گوشتی بر تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و پروتئین خام آن بود. این پژوهش با روش فاکتوریل ۲×۲×۲ در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار و پنج تکرار شامل: ۱) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه، ۲) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه و ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت، ۳) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز، ۴) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه و ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز، ۵) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه، ۶) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه و ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت، ۷) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز، ۸) پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه و ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز انجام شد. بخش‌های مختلف پروتئین با استفاده از معادلات شورای تحقیقات کشاورزی و غذایی و همچنین، فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری با روش نورفور تعیین شد. فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری و تجزیه‌پذیری مؤثر شکمبه‌ای ماده خشک و پروتئین خام با انکوباسیون شکمبه‌ای در زمان‌های مختلف انکوباسیون در گوسفندان نژاد زل دارای فیستولای شکمبه‌ای تعیین شد. مطالعه داده‌های تجزیه‌پذیری ماده خشک نشان داد که بخش سریع تجزیه‌پذیر، بالقوه تجزیه‌پذیر و نرخ ثابت تجزیه، تفاوت معنی‌داری داشتند ($P<۰/۰۵$). تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت در تیمارهای آزمایشی از نظر آماری معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). نتایج تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای پروتئین خام نشان دادند که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین بخش پروتئین خام سریع تجزیه‌پذیر، بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه پروتئین خام وجود داشت ($P<۰/۰۵$). طبق نتایج حاصل از این آزمایش می‌توان دریافت که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش ماده خشک و پروتئین خام سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر، نرخ ثابت تجزیه و همچنین، تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲ و ۵ درصد در ساعت شد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم پروتئاز، پودر پر، تجزیه‌پذیری، فرآوری، هضم‌پذیری

* نویسندهٔ مسئول: hosein_nouri90@yahoo.com

doi: 10.22124/ar.2025.29573.1878

مقدمه

افزایش قیمت مکمل‌های پروتئینی رایج و محدودیت منابع پروتئینی و در نتیجه آن، افزایش هزینه‌های تولید، علاقه‌مندی به منابع پروتئینی جدید و ارزان‌تر برای دام را به‌وجود آورده است (Cozzi et al., 1995). صنایع دام و طیور، مقادیر زیادی فرآورده‌های فرعی پروتئینی تولید می‌کنند که می‌توانند برای تغذیه نشخوارکنندگان فرآوری شوند. مزایای بازیافت این فرآورده‌های فرعی به‌عنوان مکمل‌های خوراکی برای نشخوارکنندگان، شامل قیمت به‌نسبت پایین، کاهش رقابت بیشتر بین انسان‌ها و دام برای منابع پروتئینی، کاهش هزینه‌های مربوط به برنامه‌های مدیریت ضایعات، ورود پروتئین‌ها به چرخه‌ای که به نفع دام و مصرف‌کننده است، افزایش درآمد اقتصادی، ایجاد اشتغال و مهارت‌های جدید، جلوگیری از آلودگی محیط زیست، حفظ سرمایه ملی و دستیابی به بیشینه تولید حیوان با کمترین هزینه در راستای دستیابی به کشاورزی پایدر است (Sancilio & Ruggiero, 1991; Bampidis & Robinson, 2006). در میان فرآورده‌های فرعی حیوانی، پر مرغ به‌عنوان یک فرآورده فرعی زائد در مقادیر زیادی در کشتارگاه‌های طیور تولید می‌شود. پر که ۵ تا ۷ درصد از وزن کل بدن جوجه‌های بالغ را تشکیل می‌دهد (Manczinger et al., 2003; Li, 2019)، براساس گزارش سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد در سال ۲۰۲۱، در مجموع، ۱۳۵/۲ میلیون تن مرغ گوشتی و نزدیک به ۹/۵ میلیون تن پر در دنیا تولید می‌شود. با توجه به این‌که سالانه حجم بالایی از پر در سراسر جهان تولید می‌شود که به‌طور عمده از پروتئین کراتین تشکیل شده‌اند، این فرآورده فرعی می‌تواند جایگزین بالقوه مناسبی برای منابع خوراکی پروتئینی گران‌قیمت‌تر محسوب شود (Verma et al., 2017). پودر پر فرآوری‌نشده قابلیت هضم حدود ۵/۸ درصد دارد، بنابراین به‌عنوان یک منبع پروتئین، نیاز به فرآوری دارد (Aderibigbe & Church, 1983).

روش‌های فرآوری پودر پر به‌صورت شیمیایی (احیا، اکسیداسیون، هیدرولیز، سولفیتولیز و به‌کمک مایع یونی)، فیزیکی (حرارت‌دهی، پودر کردن، هیدرولیز با بخار و تابش مایکروویو) و زیستی (میکروبی و آنزیمی) طبقه‌بندی می‌شوند (Wang et al., 2021). هیدرولیز با بخار رایج‌ترین روش فرآوری مورد استفاده در صنعت برای تبدیل پر خام به پودر پر است. فرآوری پودر پر در ایران به‌طور معمول در فشار ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلو پاسکال انجام می‌شود. با توجه به نوع فرآوری، عمل‌آوری پرها به‌خوبی انجام نمی‌شود (Hosseini et al., 2021). به‌دلیل پایین بودن قابلیت هضم کل پروتئین پر در دستگاه گوارش موجود زنده، این روش رضایت‌بخش نیست (Elmayergi & Smith, 1971; Bielorai et al., 1982). دمای بالا تحت فشار بالا ممکن است سبب از بین رفتن اسیدآمینه‌های ضروری در کراتین شود (Mokrejs et al., 2011). گزارش شده است که تیمار حرارتی برخی از اسیدهای‌آمینه مانند متیونین، لیزین و تریپتوفان را از بین می‌برد (Mehta et al., 2014). افزودن آنزیم‌های اگزوژن، همراه با فرآوری در دمای پایین و فشار کم، یکی از جایگزین‌های مورد استفاده برای کاهش آثار گرم شدن بیش از حد پودر پر، بهبود کیفیت محصول نهایی و صرفه‌جویی در انرژی خواهد بود (Pedersen et al., 2012). در فرآوری‌های ترکیبی دو مرحله‌ای، پر در دو مرحله هیدرولیز می‌شود. مرحله اولیه گاهی اوقات به‌عنوان پیش‌تیمار نامیده می‌شود که به‌طور معمول شامل تیمار فیزیکی و تیمار شیمیایی است. پیش‌تیمار یک فرآیند حیاتی برای تغییر ساختار زیست توده کراتین با شکستن پیوندهای دی‌سولفید در ساختار است، به‌طوری که هیدرولیز بعدی کراتین می‌تواند با سرعت و بازده بیشتری به‌دست آید. سپس، پرهای پیش‌تیمار شده تحت مرحله دوم تیمار قرار می‌گیرند که معمولاً تیمار زیستی است. شرایط ملایم پیش‌تیمار برای باز کردن ساختار پر به‌منظور تسهیل حمله آنزیم به پر اعمال می‌شود. Forgács (2012) نشان داد که پرهای پیش‌تیمار شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۱۰ دقیقه و سپس، تیمار با آنزیم ساویناز (Savinase)، منجر به تخریب ۹۴ درصدی ساختار پر شد. تلاش‌هایی برای بهبود ارزش تغذیه‌ای پودر پر صورت گرفته است (Serwata, 2007; Davies et al., 2009). در مطالعات اخیر گزارش شده است که میکروارگانیسم‌های کراتینولیتیک توانایی خود را در تجزیه مؤثر کراتین مدیون عملکرد ترکیبی احیاکننده‌های اگزوژن دی‌سولفید و پروتئازها هستند (Yamamura et al., 2002; Ramnani & Gupta, 2007;). این محققان مطرح کردند که احیاکننده‌ها سبب گسستن پل‌های دی‌سولفید می‌شوند و پروتئازها را قادر می‌سازند تا پیوندهای پپتیدی درون ساختار پروتئین

را هیدرولیز کنند و آن را به پپتیدها و اسیدهای‌آمینه بشکنند (Bockle & Muller, 1997).

تنظیم جیره نشخوارکنندگان به پروتئین خام بر اساس نسبت پروتئین تجزیه‌پذیر در شکمبه و پروتئین غیرقابل تجزیه در شکمبه نیاز دارد. بخش‌هایی از پروتئین یا اسیدهای‌آمینه که در شکمبه تجزیه نمی‌شوند و در روده کوچک در دسترس هستند، در بین منابع مختلف پروتئین بسیار متفاوت هستند (Cole & Haresign, 1988). عدم تعادل در نسبت پروتئین تجزیه‌پذیر و پروتئین غیرقابل تجزیه در شکمبه در جیره منجر به استفاده ناکارآمد از مواد مغذی خوراک می‌شود و از این رو، عملکرد و تولید حیوانات در حال رشد و شیرده تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Reynal, & Broderick, 2003). منابع پروتئین حیوانی اغلب دارای پروتئین غیرقابل تجزیه در شکمبه بیشتری هستند که دارای تنوع قابل توجهی در بین منابع پروتئینی هستند (Stern et al., 2006). روش کیسه‌های نایلونی یکی از روش‌های برآورد تجزیه‌پذیری پروتئین در نشخوارکنندکان است که دقت و تکرارپذیری داده‌های به‌دست آمده از آن حائز اهمیت است.

افزودن آنزیم‌های اگزوژن همراه با احیاکننده‌های شیمیایی، همراه با فرآوری در دمای پایین، یکی از جایگزین‌های مورد استفاده برای کاهش آثار گرم شدن بیش از حد پودر پر، بهبود کیفیت محصول نهایی و صرفه‌جویی در انرژی خواهد بود. به این ترتیب، استفاده از احیاکننده‌های شیمیایی همراه با پروتئازها برای تبدیل پر خام به مواد خوراکی گزینه‌ای است که نیازمند بررسی بیشتر است. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، هدف از مطالعه حاضر، تعیین اثر نوع فرآوری پر خام مرغ گوشتی بر تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و پروتئین خام آن بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در بهار ۱۴۰۲ انجام شد. به‌منظور ارزیابی آثار دما، آنزیم پروتئاز و یک احیاکننده (سدیم متابی‌سولفیت)، این پژوهش با هشت تیمار آزمایشی و پنج تکرار و با روش فاکتوریل ۲×۲×۲ در قالب یک طرح کاملاً تصادفی طراحی و انجام شده است. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح دما (دمای ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس)، دو سطح سدیم متابی‌سولفیت (صفر و ۰/۲۵ درصد) و دو سطح آنزیم پروتئاز (صفر و ۰/۱۵ درصد) به‌ترتیب زیر بودند:

۱- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه

۲- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه تیمار شده با ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت

۳- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال تیمار شده با ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز

۴- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه تیمار شده با ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز

۵- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه

۶- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه تیمار شده با ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت

۷- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال تیمار شده با ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز

۸- پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه تیمار شده با ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز

پر خام استفاده شده در این پژوهش از کشتار یک دوره جوجه گوشتی کشتار شده در کشتارگاه گروه صنعتی ساوانا تهیه شد و پس از تفکیک سایر بخش‌های اضافی نظیر ناخن، تاج، پنجه و ... به‌طور کامل شسته شده و در معرض هوا خشک شد. فرآوری پر خام تهیه شده از کشتارگاه طیور پس از اعمال تیمارهای مورد نظر به‌وسیله اتوکلاو (کاووش مگا ساخت ایران) انجام شد. در تیمارهای حاوی آنزیم و عامل احیاکننده، به‌منظور پیش‌تیمار، پرهای خام به‌مدت ۵۰ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سلسیوس با سدیم متابی-سولفیت و آنزیم پروتئاز انکوباسیون شدند و سپس، تحت تیمار به شرح بالا قرار گرفتند.

تعیین فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری ماده خشک و پروتئین خام با روش کیسه نایلونی (In situ): به‌منظور تعیین فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری ماده‌خشک و پروتئین خام از روش کیسه‌های نایلونی با استفاده از سه رأس گوسفند نژاد زل با میانگین وزن ۲±۳۰ و سن دو سال دارای فیستولای شکمبه‌ای دائمی که به‌صورت انفرادی در قفس‌های

متابولیکی نگهداری شده و در طول مدت آزمایش با جیره کاملاً مخلوط در سطح اندکی بیش از نیاز نگهداری، دو بار در شبانه‌روز تغذیه شدند، استفاده شد. مقدار ۳ گرم نمونه آسیاب شده با الک یک میلی‌متر در داخل کیسه‌هایی از جنس ابریشم مصنوعی دارای ابعاد ۱۴×۷ سانتی‌متر و قطر منافذ ۱۰±۴۰ میکرون ریخته شد. کیسه‌های حاوی نمونه برای زمان‌های صفر، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۶، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت در شکمبه انکوباسیون شدند. پس از زمان طی شده، کیسه‌ها از شکمبه خارج شده و با جریان آب معمولی کاملاً شست و شو شده تا پساب حاصل از آن شفاف شود. سپس، به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵۵ درجه سلسیوس خشک شده و پس از توزین و تعیین ماده خشک ناپدیدشده، پروتئین خام (AOAC, 1990) در باقی نمونه‌ها تعیین شد. با استفاده از رویه غیرخطی (PROC NLIN) در نرم‌افزار SAS (2002) نسخه ۹/۱، میزان ناپدید شدن مواد در زمان t و همچنین، فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری برای زمان‌های مختلف و درصد تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت بر اساس روابط زیر محاسبه شد (Ørskov & McDonald, 1979).

$$P = a + b\,(1-e^{-c(t-L)})$$
$$ED = a + [(b \times c) / (c + k_p)]$$

در روابط بالا، P، پتانسیل تجزیه‌پذیری یا ناپدید شدن در زمان t؛ a، بخش سریع تجزیه‌پذیر؛ b، بخش آهسته تجزیه‌پذیر؛ c، ثابت نرخ تجزیه؛ ED، تجزیه‌پذیری مؤثر؛ k_p، ثابت نرخ خروج شیرابه هضمی از شکمبه؛ t، زمان ماندگاری نمونه در شکمبه (ساعت)؛ e، عدد نپر (۲/۷۱۸) و L، زمان تأخیر است.

تعیین بخش‌های مختلف پروتئین با استفاده از معادلات شورای تحقیقات کشاورزی و غذایی (۱۹۹۵): به‌منظور برآورد مقادیر پروتئین سریع تجزیه‌شونده، پروتئین کند تجزیه‌شونده، پروتئین قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم و پروتئین قابل سوخت و ساز از معادلات شورای تحقیقات کشاورزی و غذایی استفاده شد (AFRC, 1995). با استفاده از ضرایب تجزیه‌پذیری پروتیین خام a، b و c به‌دست آمده از روش کیسه‌های نایلونی و همچنین، میزان پروتئین نامحلول در شوینده اسیدی حاصل از مواد خوراکی، فراسنجه‌های مربوط به برآورد پروتئین قابل سوخت و ساز و فراسنجه‌های مربوط به آن با استفاده از روابط زیر تخمین زده شد (AFRC, 1995):

$$QDP\ (g/100gDM) = a \times CP$$
$$SDP\ (g/100gDM) = (bc/c+k) \times CP$$
$$RDP(g/100gDM) = QDP + SDP$$
$$ERDP\ (g/100gDM) = 0.8\ (QDP) + (SDP)$$
$$UDP\ (g/100gDM) = CP - (QDP + SDP)$$
$$DUP\ (g/100gDM) = 0.9\ (UDP - (ADICP)$$
$$MP\ (g/100gDM) = 0.6375 \times (ERDP) + DUP$$

که در این معادلات، QDP: پروتئین سریع تجزیه‌شونده در شکمبه؛ SDP: پروتئین کند تجزیه‌شونده در شکمبه؛ RDP: پروتئین قابل تجزیه در شکمبه؛ ERDP: پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه؛ UDP: پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه؛ DUP: پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم؛ MP: پروتئین قابل سوخت و ساز؛ CP: پروتئین خام و k: نرخ عبور مواد هضمی است.

تعیین فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری به روش نورفور (NorFor): در این آزمایش، مقدار پروتئین محلول پودر پر فرآوری شده با استفاده از روش Volden (2011) اندازه‌گیری شد. در این روش، پروتئین محلول نمونه‌ها با استفاده از بافر بورات-فسفات (pH=۶/۷۵ و دمای ۳۹ درجه سلسیوس) استخراج شد و سپس، به‌روش کجلدال مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در سیستم نورفور مقدار بخش کند تجزیه حاصل از نتایج تجزیه‌پذیری با توجه به مقدار پروتئین خام محلول و به‌عنوان پروتئین خام دارای پتانسیل تجزیه‌پذیری بر اساس رابطه زیر ارائه شد:

$$PdCP = b+(a-SCP)\times(b/1-a)$$

که در این معادله، PdCP: پروتئین خام با پتانسیل تجزیه‌پذیری؛ a: مقدار ماده قابل حل در زمان صفر؛ b: مقدار مواد غیرمحلول قابل تخمیر و SCP: پروتئین خام محلول است.

مدل و تجزیه و تحلیل آماری: داده‌های حاصل با استفاده از رویه GLM در نرم‌افزار SAS (2002) نسخه ۹/۱ در قالب طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار و پنج تکرار با روش فاکتوریل ۲×۲×۲ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین‌های تیمارهای آزمایشی با آزمون دانکن در سطح احتمال معنی‌داری برابر با ۰/۰۵ انجام شد.

نتایج و بحث

ترکیبات شیمیایی: ترکیبات شیمیایی پودر پر فرآوری شده در دمای مختلف با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (میانگین درصد±انحراف معیار) در جدول ۱ ارائه شده است.

فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک: از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش محلول (سریع تجزیه-پذیر) و بخش بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه وجود داشت، اما از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش آهسته تجزیه‌پذیر وجود نداشت (جدول ۳). تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت در تیمارهای آزمایشی از نظر آماری معنی‌دار بود. استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش سریع تجزیه‌پذیر (P=۰/۰۰۰۵)، بخش ماده خشک بالقوه تجزیه‌پذیر (P=۰/۰۲۴۰) و همچنین، نرخ ثابت تجزیه ماده خشک (P<۰/۰۰۰۱) داشت، اما اثر معنی‌داری بر بخش ماده خشک آهسته تجزیه‌پذیر نداشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش ماده خشک سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه-پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه شد. افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش ماده خشک سریع تجزیه‌پذیر (P<۰/۰۰۰۱)، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر (P=۰/۰۰۱۹) و همچنین، نرخ ثابت تجزیه (P<۰/۰۰۰۱) داشته است، اما اثر معنی‌داری بر بخش آهسته تجزیه‌پذیر نداشت، به‌طوری که افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام سبب افزایش بخش سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه شد. تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک با استفاده از نرخ عبور شکمبه‌ای ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت محاسبه شد. مقادیر تجزیه‌پذیری مؤثر ماده خشک با افزایش نرخ خروج کاهش یافت. بیشترین تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت به‌ترتیب مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (به‌ترتیب ۴۸/۸۳، ۴۵/۷۶ و ۴۳/۳۷ درصد) بود. کمترین تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت به‌ترتیب مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس (به-ترتیب ۳۹/۳۲ ، ۳۶/۰۸ و ۳۳/۶۶ درصد) بود. استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک در نرخ عبور ۲ (P=۰/۰۱۴۹)، ۵ (P=۰/۰۰۸۷) و ۸ (P=۰/۰۰۵۹) درصد در ساعت داشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت شد. افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک در نرخ عبور ۲ (P=۰/۰۰۱۲) ، ۵ (P=۰/۰۰۰۷) و ۸ (P=۰/۰۰۰۵) درصد در ساعت داشت، به‌طوری که افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام سبب افزایش تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت شد. در راستای نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، محققین مقدار مشابهی را برای بخش ماده خشک سریع تجزیه‌پذیر (۱۷/۵ درصد)، مقادیر بالاتری را برای بخش آهسته تجزیه‌پذیر (۴۶/۴ درصد) و مقادیر پایین‌تری را برای نرخ ثابت تجزیه (۰/۰۶۰ درصد در ساعت) برای پودر پر رایج (پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس) گزارش کردند (Kamalak et al., 2005). همچنین، همین محققین مقادیر بالاتری را برای تجزیه‌پذیری مؤثر ماده خشک در نرخ عبور ۲ (۵۲/۲)، ۵ (۴۲/۷) و ۶ (۴۰/۶) درصد در ساعت برای پودر پر رایج گزارش کردند. در تیمارهای حاوی سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز، افزایش بخش محلول و محلول شدن پروتئین پودر پر، نشان‌دهنده افزایش تجزیه‌پذیری آن در شکمبه است. به این ترتیب، افزایش حلالیت پروتئین‌های پودر پر و دسترسی بیشتر آن برای باکتری‌های شکمبه دلیل افزایش تجزیه‌پذیری آن در این پژوهش است، که علت این امر، شکسته شدن پیوندهای دی‌سولفیدی موجود و آزاد شدن پلی‌پپتیدها، پپتیدها و اسیدهای آمینه در تیمارهای فرآوری شده با سدیم متابی-سولفیت و آنزیم پروتئاز بوده است، زیرا تعداد زیادی از باکتری‌ها مثل *Bacteroides ruminicola* به‌طور مستقیم از پپتیدها استفاده می‌کنند (Pittman & Bryant, 1964). Zarnegar et al. (2019) بیان کردند که محتوای بخش سریع تجزیه‌پذیر پروتئین خام پودر پر نسبتاً کم است و با بالا رفتن نرخ عبور، تجزیه‌پذیری مؤثر پروتئین خام کاهش می‌یابد (Zarnegar et al., 2018). بنابراین، با توجه به موارد یاد شده می‌توان چنین بیان کرد که بخش قابل توجهی از پروتئین پودر پر در برابر هضم شکمبه‌ای مقاوم بوده و به روده باریک منتقل می‌شود. از نظر تجزیه‌پذیری ماده خشک در شکمبه، بین گونه‌های مختلف تفاوت وجود دارد. در هر گونه نیز جنس، سن و شرایط فیزیولوژیکی (نظیر آبستنی، مرحله شیردهی و...) بر قابلیت هضم ماده خشک در شکمبه تأثیر می‌گذارد (Nocek, 1988; Ørskov, 2002). علاوه بر موارد ذکر شده، مقدار ماده خشک مصرفی، اندازه ذرات جیره، نسبت علوفه به کنسانتره نیز بر قابلیت هضم ماده خشک در شکمبه تأثیرگذار است (Ørskov, 2002). در

تعیین تجزیه‌پذیری ماده خشک و مواد مغذی به روش کیسه‌های نایلونی عواملی از قبیل تعداد منافذ موجود در کیسه‌ها، قطر منافذ، اندازه مساحت کیسه‌ها، وزن کیسه‌ها، اندازه ذرات نمونه و روش شستن کیسه‌ها پس از خروج آن‌ها از شکمبه نیز بر مقدار ماده خشک نمونه که در شکمبه تجزیه می‌شود، تأثیر دارند (Nocek, 1988; Ørskov, 2002).

فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای پروتئین خام: مقادیر بخش پروتئین خام سریع تجزیه‌پذیر، بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه پروتئین خام، تفاوت معنی‌داری داشتند، اما از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش پروتئین خام آهسته تجزیه‌پذیر وجود نداشت (جدول ۳). تجزیه‌پذیری مؤثر پروتئین خام در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت در تیمارهای آزمایشی از نظر آماری، معنی‌دار بود. افزودن سدیم متابی‌سولفیت طی فرآوری پر خام اثر معنی‌داری بر بخش سریع تجزیه‌پذیر ($P<$۰/۰۰۰۱)، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر ($P=$۰/۰۰۳۸) و همچنین، نرخ ثابت تجزیه ($P=$۰/۰۰۱۳) داشت، اما اثر معنی‌داری بر بخش آهسته تجزیه‌پذیر نداشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی-سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه شد. اضافه کردن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش سریع تجزیه‌پذیر ($P=$۰/۰۰۱۰)، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر ($P=$۰/۰۰۹۳) و همچنین، نرخ ثابت تجزیه ($P<$۰/۰۰۰۱) داشته است، اما اثر معنی‌داری بر بخش آهسته تجزیه‌پذیر نداشت، به‌طوری که افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام سبب افزایش بخش سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه شد.

تجزیه‌پذیری موثر پروتئین خام با استفاده از نرخ عبور شکمبه‌ای ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت محاسبه شد. مقادیر تجزیه‌پذیری موثر پروتئین خام با افزایش نرخ عبور، کاهش یافت. بیشترین تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت به‌ترتیب مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (به‌ترتیب ۴۶/۵۶، ۴۳/۶۲ و ۴۱/۳۳ درصد) بود. کمترین تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت به‌ترتیب مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس با آنزیم پروتئاز (به‌ترتیب ۳۶/۳۶، ۳۳/۳۵ و ۳۱/۱۰ درصد)، بود. افزودن سدیم متابی‌سولفیت طی فرآوری پر خام به‌طور معنی‌داری بر تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲ ($P=$۰/۰۰۲۳)، ۵ ($P=$۰/۰۰۱۳) و ۸ ($P=$۰/۰۰۰۸) درصد در ساعت اثر داشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت شد. استفاده از آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲ ($P=$۰/۰۰۵۵)، ۵ ($P=$۰/۰۰۳۰) و ۸ ($P=$۰/۰۰۲۰) درصد در ساعت داشت، به‌طوری که افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام سبب افزایش تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور ۲، ۵ و ۸ درصد در ساعت شد. مقادیر بخش سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر و همچنین، نرخ ثابت تجزیه به‌دست آمده در این پژوهش برای پودر پر رایج (پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس)، مشابه نتایج گزارش شده به‌وسیله Marghazani et al. (2013) (بخش سریع تجزیه‌پذیر (۱۷/۴۰ درصد)، بخش آهسته تجزیه‌پذیر (۲۰/۰۵ درصد) و نرخ ثابت تجزیه (۰/۱۵۵۳ درصد در ساعت)) بود. Habib et al. (2013) و Kamalak et al. (2005) مقدار مشابهی را برای بخش سریع تجزیه‌پذیر (به‌ترتیب ۱۴/۸ و ۱۵/۸ درصد)، مقادیر بالاتری را برای بخش آهسته تجزیه‌پذیر (به‌ترتیب ۴۶/۸ و ۴۸/۳ درصد) و مقادیر پایین‌تری را برای نرخ ثابت تجزیه (به‌ترتیب ۰/۰۶۰ و ۰/۰۵۵ درصد در ساعت) برای پودر پر رایج (پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس) گزارش کردند (Kamalak et al., 2005; Habib et al., 2013).

در تیمارهای حاوی سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز، بخش سریع تجزیه‌پذیر به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، بنابراین می‌توان انتظار داشت که فرآوری با سدیم متابی-سولفیت و آنزیم پروتئاز سبب افزایش تجزیه‌پذیری پروتئین خام در شکمبه می‌شود زیرا به‌طور معمول، تجزیه پروتئین با افزایش قابلیت حل شدن آن در مایع شکمبه، افزایش می‌یابد (NRC, 2000). بر اساس نتایج به‌دست آمده، افزایش بخش محلول (سریع تجزیه‌پذیر) در تیمارهای حاوی سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز را می‌توان به شکسته شدن پیوندهای دی‌سولفیدی، پیوندهای هیدروژنی و سایر پیوندهای ضعیف غیرکوالانسی و در نهایت، بالا رفتن آب‌دوستی سطح پروتئین‌ها نسبت داد.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی پودر پر فرآوری شده در دمای مختلف با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (درصد)

Table 1. Chemical compositions of processed raw feathers at different temperatures with sodium metabisulfite and protease (%)

Chemical composition	Experimental treatments*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Dry matter (%)	94.36±3.40	93.28±0.9	95.49±1.62	92.82±3.04	93.77±1.41	93.39±2.1	94.56±1.40	92.61±1.51
Organic matter (%)	93.76±0.34	94.78±0.15	94.46±0.51	94.08±0.6	93.98±0.99	94.45±0.18	93.77±0.5	94.76±0.7
Crude protein (%)	88.51±1.61	87.38±1.49	86.94±0.8	89.20±3.07	89.37±1.62	88.22±0.9	89.25±2.19	88.31±1.24
Ash (%)	6.24±0.34	5.22±0.15	5.54±0.51	5.92±0.6	6.02±0.99	5.55±0.18	6.23±0.5	5.24±0.7
Crude fat (%)	3.36±0.21	3.46±0.52	3.45±0.72	3.60±0.45	3.53±0.21	3.46±0.83	3.56±0.49	3.64±0.2

* Experimental treatments: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme.

Kamalak et al. (2005) دریافتند که کنیتیک تجزیه‌پذیری منابع پروتئینی گیاهی و حیوانی می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند روش فرآوری، اندازه منافذ کیسه، نوع منبع پروتئین و اندازه ذرات سوبسترا قرار گیرد. پودر پر حاوی مقادیر به‌نسبت بالایی از اسیدهای‌آمینه گوگرددار مانند سیستئین و متیونین است (Goedeken et al., 1990)، که این اسیدهای آمینه سبب ایجاد اتصالات محکمی در ساختار پروتئین پودر پر می‌شوند و وجود این اتصالات مستحکم منجر به کاهش تجزیه‌پذیری پروتئین پودر پر در شکمبه می‌شود (Kim et al., 2002). Pfeuti (2017) گزارش داد که افزودن سولفیت سدیم طی فرآوری سبب کاهش شیمیایی پل‌های دی‌سولفیدی می‌شود و ظرفیت آنزیم را برای هیدرولیز پودر پر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. Eslahi et al. (2013)، Gupta & Ramnani (2007) و همچنین، Yamamura et al. (2002) گزارش کردند که افزودن عوامل احیا کننده به‌طور چشمگیری سبب افزایش ظرفیت آنزیمی می‌شود به‌طوری که یک عامل احیا کننده (احیا کننده دی‌سولفید یا احیا کننده شیمیایی)، که در مورد تحقیق حاضر، سدیم متابی‌سولفیت است، تجزیه کراتین را با گسستن پل‌های دی‌سولفیدی افزایش داده و در نتیجه، دسترسی پروتئازها به پیوندهای پپتیدی را تسهیل می‌کند که این امر در نهایت منجر به افزایش بخش سریع تجزیه‌پذیر شده است (Yamamura et al., 2002; Ramnani & Gupta, 2007; Eslahi et al., 2013). Blasi et al. (1991) گزارش کردند که اسیدهای آمینه گوگرددار از جمله اسید آمینه‌های محدودکننده در پروتئین میکروبی هستند (Blasi et al., 1991). از آنجایی‌که پودر پر منبع مناسبی از این اسیدهای‌آمینه گوگرددار است، تامین این اسیدهای‌آمینه و دسترسی آن برای میکرارگانیسم‌ها سبب افزایش تجزیه‌پذیری آن شده است.

در راستای نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، Marghazani et al. (2013) نتایج تقریباً مشابهی را برای تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲ (۳۳/۷۴)، ۵ (۳۰/۰۹) و ۸ (۲۷/۸۵) درصد در ساعت برای پودر پر رایج (پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس) ارائه دادند. Habib et al. (2013) و Kamalak et al. (2005) مقادیر بالاتری را برای تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲ (به‌ترتیب ۴۹/۴ و ۵۱/۳)، ۵ (به‌ترتیب ۴۰/۸ و ۴۱/۲)، ۶ (۳۹/۰) و ۸ (۳۳/۴) درصد در ساعت گزارش کردند.

Nazem et al. (2008) گزارش کردند که با افزایش سرعت عبور مواد از شکمبه، میزان تجزیه‌پذیری مؤثر پروتئین کاهش یافت زیرا با افزایش سرعت عبور، دسترسی میکروارگانیسم های شکمبه به مواد خوراکی کاهش یافت. درصد تجزیه‌پذیری مؤثر پروتئین نشان‌دهنده افزایش شدت و وسعت تخمیر شکمبه‌ای آن است (Aksu et al., 2004). این افزایش ناشی از افزایش قابلیت دسترسی پروتئین به‌دلیل تاثیر افزودنی‌ها و میکروارگانیسم‌ها است. پایین بودن تجزیه‌پذیری پروتئین پودر پر رایج می‌تواند سبب ساخت کارآمد پروتئین میکروبی شود. همچنین، پایین بودن تجزیه‌پذیری پروتئین پودر پر رایج می‌تواند به‌طور معنی‌داری سبب افزایش میزان پروتئین حقیقی قابل هضم در روده باریک شود که به‌دلیل محدود کردن تخمیر، دکربوکسیلاسیون پروتئین و افزایش میزان پروتئین غیرقابل تجزیه در شکمبه از راه کاهش تجزیه پروتئین در شکمبه است.

جدول ۲- اثر فرآوری پر خام بر فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای (درصد)، ثابت نرخ تجزیه (درصد) و تجزیه‌پذیری مؤثر (درصد در ساعت) ماده خشک

Table 2. Effect of raw feather processing on ruminal degradability parameters (%), coefficient of degradability (%), and effective degradability (%/h) of dry matter

Parameters	Experimental treatments [1]								SEM	*P*-value [2]						
	1	2	3	4	5	6	7	8		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Degradability parameters																
Fast degradable fraction (*a*)	17.08^{d}	19.66^{dc}	20.09^{c}	23.35^{ab}	18.24^{dc}	19.94^{c}	21.03^{bc}	24.25^{a}	0.310	0.2045	0.0005	0.0001	0.7135	0.8739	0.3895	0.7412
Slow degradable fraction (*b*)	25.09	24.76	25.10	27.39	26.74	25.44	26.50	27.18	0.315	0.1829	0.6068	0.1198	0.3220	0.6600	0.0866	0.7978
Potential degradable fraction (*a*+*b*)	42.18^{c}	44.42^{c}	45.19^{c}	50.74^{ab}	44.98^{c}	45.38^{bc}	47.54^{abc}	51.42^{a}	0.606	0.1802	0.0240	0.0019	0.4801	0.8821	0.1798	0.9714
Coefficient of degradability (C)	0.1554^{c}	0.1643^{b}	0.1658^{b}	0.1844^{a}	0.1604^{bc}	0.1674^{b}	0.1683^{b}	0.1899^{a}	0.0009	0.0509	0.0001	0.0001	0.8992	0.9928	0.0040	0.5234
Effective degradability																
Kp = 0.02	39.32^{b}	41.73^{b}	42.49^{b}	47.06^{a}	42.02^{a}	42.67^{b}	44.72^{ab}	48.83^{a}	0.584	0.1745	0.0149	0.0012	0.5008	0.8956	0.1753	0.9500
Kp = 0.05	36.08^{c}	38.64^{bc}	39.37^{bc}	44.90^{a}	38.63^{bc}	39.53^{bc}	41.47^{ab}	45.76^{a}	0.556	0.1696	0.0087	0.0007	0.5152	0.9137	0.1727	0.9254
Kp = 0.08	33.66^{c}	36.31^{bc}	37.02^{bc}	42.46^{a}	36.08^{bc}	37.16^{bc}	39.01^{ab}	43.37^{a}	0.533	0.1671	0.0059	0.0005	0.5456	0.9294	0.1729	0.9066

[a-d] Means in each row with different superscript letters have significant differences (P<0.05).

[1] Experimental treatments: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme.

[2] A: Effect of temperature; B: Effect of sodium metabisulfite addition; C: Effect of protease enzyme addition; AB: Interaction effect between factors A and B; AC: Interaction effect between factors A and C; BC: Interaction effect between factors B and C; ABC: Interaction effect of three factors A, B, and C.

از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تجزیه پروتئین در شکمبه، نوع پروتئین، اثر متقابل با مواد مغذی دیگر، به‌طور عمده کربوهیدرات‌های موجود در مواد خوراکی و محتویات داخل شکمبه و جمعیت‌های میکروبی غالب، نوع خوراک، نرخ عبور شکمبه‌ای و pH شکمبه برشمرده شده است (Nagaraja & Titgemeyer, 2007). زیاد بودن نسبت تجزیه‌پذیری مؤثر سبب فراهم نمودن انرژی مورد نیاز به شکل‌های اسیدهای چرب فرار برای دام و میکروب‌های شکمبه می‌شود (Radunz et al., 2003). مهمترین عوامل مؤثر بر تجزیه پروتئین در شکمبه، غلظت آنزیم‌ها و pH شکمبه و نحوه عمل‌آوری مواد خوراکی است (Nocek, 1988). تجزیه‌پذیری پروتئین‌ها در شکمبه را می‌توان با افزایش مدت زمان توقف نمونه‌ها در شکمبه افزایش داد (Ørskov, 2002). عوامل شناخته شده مربوط به جیره مصرفی که روی مدت زمان ماندن مواد مغذی در شکمبه تأثیر می‌گذارد، شامل مقدار مصرف خوراک، اندازه ذرات جیره، دفعات خوراک دادن و مقدار نمک‌های معدنی و بافر استفاده شده در جیره است (Sniffen et al., 1992).

بخش‌های مختلف پروتئین با استفاده از معادلات شورای تحقیقات کشاورزی و غذایی (AFRC) و سیستم نورفور (NorFor): مقادیر پروتئین سریع تجزیه‌شونده در شکمبه، پروتئین کند تجزیه‌شونده در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم و پروتئین قابل سوخت و ساز پر خام فرآوری شده در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه موثر در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه موثر در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم و پروتئین قابل سوخت و ساز وجود داشت، اما از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش پروتئین کند تجزیه‌شونده در شکمبه وجود نداشت. بیشترین بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده، بخش پروتئین قابل تجزیه و همچنین، بخش پروتئین قابل تجزیه موثر در شکمبه مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (به‌ترتیب ۲۰/۰۶، ۴۱/۱۳ و ۳۷/۱۲ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) و کمترین آن مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس (به‌ترتیب ۱۳/۵۰، ۳۲/۱۹ و ۲۹/۴۹ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) بود. بیشترین و کمترین بخش پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه به‌ترتیب مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس (۴۸/۸۹ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) و پر خام فرآوری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (۴۱/۵۷ گرم در صد گرم ماده خشک) بود. بیشترین بخش پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم و پروتئین قابل سوخت و ساز مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس (به‌ترتیب ۴۳/۲۷ و ۶۳/۰۰ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) و کمترین آن مربوط به پر خام فرآوری شده در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز (به‌ترتیب ۳۰/۸۱ و ۵۴/۲۹ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) بود. افزودن سدیم متابی‌سولفیت طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده (P=۰/۰۰۰۲)، بخش پروتئین قابل تجزیه (P=۰/۰۰۴۲)، بخش پروتئین قابل تجزیه موثر در شکمبه (P=۰/۰۰۷۲)، پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه (P=۰/۰۰۲۰) و همچنین، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم (P=۰/۰۴۱۴) داشت، اما اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین کند تجزیه‌شونده و پروتئین قابل سوخت و ساز در شکمبه نداشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده، بخش پروتئین قابل تجزیه موثر و کاهش پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه و همچنین، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم در شکمبه شد. اضافه کردن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده (P=۰/۰۰۱۱)، بخش پروتئین قابل تجزیه (P=۰/۰۰۷۸)، بخش پروتئین قابل تجزیه موثر در شکمبه (P=۰/۰۱۱۳)، پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه (P=۰/۰۰۶۴) و همچنین، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم (P=۰/۰۲۲۴) داشت، اما اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین کند تجزیه‌شونده در شکمبه و همچنین، پروتئین قابل سوخت و ساز نداشت، به‌طوری که استفاده از آنزیم پروتئاز در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش پروتئین سریع تجزیه‌شونده، بخش پروتئین قابل تجزیه، بخش پروتئین قابل تجزیه موثر و کاهش پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه و همچنین، پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم شد. همچنین، اثر دمای فرآوری بر بخش پروتئین غیر قابل

تجزیه قابل هضم (P=۰/۰۰۰۶) و همچنین، پروتئین قابل سوخت و ساز (P=۰/۰۰۰۱) معنی‌داری بود، به‌طوری که فرآوری در دمای پایین‌تر (۱۰۰ درجه سلسیوس) سبب افزایش بخش پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم و همچنین، پروتئین قابل سوخت و ساز شد. اندازه‌گیری پروتئین عبوری از شکمبه نمی‌تواند از نظر تعیین ارزش تغذیه‌ای مفید باشد زیرا پس از عبور این پروتئین از شکمبه و ورود آن به روده ممکن است مورد استفاده قرار نگیرد و بدون آن‌که هضم شود از دستگاه گوارش خارج شود (Erasmus et al., 1994). فرآوری پودر پر سبب کاهش پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه شده است که دلیل آن را می‌توان به افزایش پروتئین قابل تجزیه در شکمبه و پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه نسبت داد. در محاسبه پروتئین قابل سوخت و ساز با روش کیسه‌های نایلونی، علاوه بر متغیرهایی مانند مقدار پروتئین سریع تجزیه‌شونده و پروتیین کند تجزیه‌شونده، بخش پروتئین قابل تجزیه مؤثر و پروتئین غیر قابل تجزیه قابل هضم در روده نیز تأثیر خواهند داشت (AFRC, 1992). علاوه بر ماهیت خوراک که می‌تواند بر نرخ تجزیه‌پذیری تأثیر داشته باشد، فرآوری در حرارت بالا می‌تواند بخش سریع تجزیه‌شونده در شکمبه را کاهش دهد (Aldrich, 1995). بنابراین، با توجه به فرآوری انجام شده در پژوهش حاضر، دلیل افزایش بخش سریع تجزیه را می‌توان به شکسته شدن پیوندها و در دسترس قرار گرفتن پروتئین‌های پودر پر نسبت داد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، افزایش مقادیر پروتئین سریع تجزیه‌شونده در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه و کاهش مقادیر پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه در پر خام فرآوری شده با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز را می‌توان به شکسته شدن پیوندهای دی‌سولفیدی، پیوندهای هیدروژنی و سایر پیوندهای غیرکوالانسی ضعیف نسبت داد. مقادیر نسبتاً زیادی از اسیدهای آمینه سیستئین و متیونین (اسیدهای آمینه گوگرددار) در پودر پر موجود است (Latshaw, 1990). Liu et al. (2024) گزارش کردند که اسیدهای آمینه گوگرددار منجر به ایجاد اتصالات محکمی در ساختار پروتئین پودر پر می‌شوند که نتیجه تشکیل این اتصالات مستحکم، کاهش تجزیه‌پذیری پروتئین در شکمبه است. Lian et al. (2020) گزارش کردند که افزودن عوامل احیاکننده طی فرآوری سبب کاهش پل‌های دی‌سولفیدی می‌شود و توانایی آنزیم را برای هیدرولیز پودر پر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد (Lian et al., 2020). سدیم متابی‌سولفیت (به‌عنوان یک عامل احیاکننده)، تجزیه کراتین را با گسستن پل‌های دی‌سولفیدی افزایش داده و در نتیجه، دسترسی پروتئازها به پیوندهای پپتیدی را تسهیل می‌کند که این امر در نهایت سبب شده تا مقادیر پروتئین سریع تجزیه‌شونده در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه در شکمبه، پروتئین قابل تجزیه مؤثر در شکمبه و کاهش مقادیر پروتئین غیر قابل تجزیه در شکمبه پر خام فرآوری شده افزایش یابد (Guang & Huali, 2017).

مقادیر پروتئین خام، پروتئین خام محلول، پروتئین خام با پتانسیل تجزیه‌پذیری و ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام پر خام فرآوری شده بر اساس سیستم نورفور در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که پروتئین خام محلول پر خام فرآوری شده تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش‌های پروتئین خام محلول وجود داشت. افزودن سدیم متابی-سولفیت و آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین خام محلول (P<۰/۰۰۰۱) داشت، به-طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش پروتئین خام محلول شد. همچنین، اثر دمای مختلف در فرآوری پر خام بر بخش پروتئین خام محلول (P=۰/۰۲۹۲) معنی‌داری بوده است، به‌طوری که فرآوری در دمای پایین (۱۰۰ در مقایسه با ۱۲۰ درجه سلسیوس) سبب افزایش بخش پروتئین خام محلول شد. پروتئین خام با پتانسیل تجزیه‌پذیری پر خام فرآوری شده تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین بخش‌های پروتئین خام با پتانسیل تجزیه‌پذیری وجود داشت. افزودن سدیم متابی-سولفیت طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر بخش پروتئین خام با پتانسیل تجزیه‌پذیری (P=۰/۰۰۰۸) داشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش پروتئین خام با پتانسیل تجزیه-پذیری شد. ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام پر خام فرآوری شده تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت و از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام وجود داشت. افزودن سدیم متابی‌سولفیت طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام

(P=۰/۰۰۱۳) داشت، به‌طوری که استفاده از سدیم متابی-سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام شد. اضافه کردن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام، اثر معنی‌داری بر ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام (P<۰/۰۰۰۱) داشته است، به‌طوری که افزودن آنزیم پروتئاز طی فرآوری پر خام سبب افزایش ثابت نرخ تجزیه پروتئین خام شد. کاهش حلالیت پروتئین خام و متعاقباً حلالیت بافر و تجزیه‌پذیری شکمبه در نتیجه حرارت دادن به‌خوبی شناخته شده و اغلب گزارش شده است (Mustafa et al., 1999; Nasri et al., 2008). علاوه بر این، تغییرات در درصد ساختارهای ثانویه پروتئین از قبیل کاهش مارپیچ‌های α و افزایش صفحات β می‌تواند به‌عنوان یک عامل در تیمارهای حرارتی در نظر گرفته شود (Yu, 2005). نسبت بالایی از پروتئین و اسیدهای‌آمینه حساس به حرارت (سیستئین)، آن را مستعد آثار گرمایی می‌کند (Van Soest, 1994). بخش‌های پروتئین خام محلول به سرعت در شکمبه تجزیه می‌شوند (Alzueta et al., 2001). دلیل افزایش بخش پروتئین خام محلول در پر فرآوری شده با سدیم متابی‌سولفیت و آنزیم پروتئاز را می‌توان به شکسته شدن پیوندهای دی‌سولفیدی و هیدروژنی و آزاد شدن قسمتی ازپپتیدها و اسیدهای‌آمینه‌ی پودر پر نسبت داد. نتایج پژوهشی که به‌وسیله Tham et al. (2008) انجام شد نشان داد که با افزایش دمای فرآوری (از ۱۰۰ به ۱۴۰ درجه سلسیوس)، مقادیر بخش‌های پروتئین خام محلول به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. McKinnon et al. (1995) گزارش دادند که فرآوری کنجاله کانولا در دمای ۱۲۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۰ دقیقه سبب کاهش تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای آن می‌شود (McKinnon et al., 1995). در این پژوهش، افزایشی در بخش پروتئین خام محلول با افزودن آنزیم پروتئاز و سدیم متابی‌سولفیت طی فرآوری مشاهده شد، به‌طوری که افزودن سدیم متابی‌سولفیت به‌صورت چشمگیری ظرفیت آنزیمی را افزایش داد. نتایج حاضر در تطابق با نتایج ارائه شده به‌وسیله چندین محقق است، به-طوری که یک عامل احیاکننده (احیاکننده دی‌سولفید یا احیاکننده شیمیایی)، تجزیه کراتین را با گسستن پل‌های دی‌سولفیدی افزایش می‌دهد و در نتیجه، دسترسی پروتئازها به پیوندهای پپتیدی را تسهیل می‌کند (Ramnani & Gupta, 2007; Eslahi et al., 2013). کراتین حاوی غلظت بالایی از سیستئین، یک اسید آمینه با خاصیت تشکیل پل‌های دی‌سولفید قوی با سایر مولکول-های سیستئین واقع در زنجیره‌های پپتیدی مجاور یا در قسمت‌های مختلف یک زنجیره پپتیدی، است. پیوندهای دی‌سولفیدی که به‌وسیله محتوای بالای سیستئین ایجاد می‌شوند، پلی پپتیدهای کراتین را محکم در کنار هم نگه می‌دارند و ساختاری مقاوم در برابر پروتئازها ایجاد می‌کنند (Wrześniewska-Tosik & Adamiec, 2007). میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده کراتین، احیاکننده‌های دی‌سولفید اگزوژن ترشح می‌کنند که با گسستن پیوندهای دی‌سولفید، ساختار پروتئین کراتین را باز می‌کند، پیوندهای پپتیدی را در معرض قرار می‌دهند و شکاف پپتیک را به‌وسیله پروتئاز امکان‌پذیر می‌کنند (Bockle & Muller, 1997; Yamamura et al., 2002; Ramnani & Gupta, 2007).

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از سدیم متابی‌سولفیت در فرآوری پر خام سبب افزایش بخش ماده خشک و پروتئین خام سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر، نرخ ثابت تجزیه و همچنین، تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۲ و ۵ درصد در ساعت شد. همچنین، فرآوری پر خام با آنزیم پروتئاز سبب افزایش بخش سریع تجزیه‌پذیر، بخش بالقوه تجزیه‌پذیر، نرخ ثابت تجزیه و همچنین، تجزیه‌پذیری مؤثر در نرخ عبور ۵ و ۸ درصد در ساعت ماده خشک و پروتئین خام شد. با توجه به عدم تفاوت در ترکیبات شیمیایی در بین تیمارها و همچنین، افزایش بخش ماده خشک و پروتئین خام سریع تجزیه‌پذیر و بخش بالقوه تجزیه‌پذیر پروتئین در تیمارهای فرآوری شده در دمای پایین‌تر (۱۰۰ درجه سلسیوس) همراه با آنزیم پروتئاز و عوامل احیاکننده، تیمار پر خام اتوکلاو شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۲ کیلوپاسکال به‌مدت ۲۰ دقیقه تیمار شده با ۰/۲۵ درصد سدیم متابی‌سولفیت و ۰/۱۵ درصد آنزیم پروتئاز، یکی از جایگزین‌های مورد استفاده برای کاهش آثار منفی گرم شدن بیش از حد پودر پر، بهبود کیفیت فرآورده نهایی و صرفه‌جویی در انرژی خواهد بود. بنابراین، توصیه می‌شود برای فرآوری صنعتی و کاربردی پر خام از فرآیند اتوکلاو مذکور استفاده شود.

جدول ۳- اثر فرآوری پر خام بر فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای (درصد)، ثابت نرخ تجزیه (درصد) و تجزیه‌پذیری مؤثر (درصد در ساعت) پروتئین خام

Table 3. Effect of raw feather processing on ruminal degradability parameters (%), Coefficient of degradability (%) and effective degradability (%/h) of crude protein

Parameters	Experimental treatments								SEM	*P*-value [2]						
	1	2	3	4	5	6	7	8		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Degradability parameters																
Fast degradable fraction (*a*)	15.23^{b}	18.51^{b}	17.53^{b}	21.64^{a}	16.27^{b}	17.82^{b}	17.35^{b}	22.71^{a}	0.356	0.6691	0.0001	0.0010	0.8665	0.8520	0.1234	0.3121
Slow degradable fraction (*b*)	23.76	24.21	24.69	26.47	24.18	25.55	25.31	26.32	0.480	0.5696	0.2469	0.2043	0.9693	0.7413	0.8252	0.6658
Potential degradable fraction (*a*+*b*)	38.99^{c}	42.72^{abc}	42.22^{bc}	48.11^{ab}	40.45^{c}	43.37^{abc}	42.66^{abc}	49.03^{a}	0.698	0.5432	0.0038	0.0093	0.9527	0.8949	0.3312	0.8212
Coefficient of degradability (C)	0.1609^{c}	0.1708^{bc}	0.1781^{b}	0.1908^{a}	0.1681^{bc}	0.1738^{b}	0.1791^{b}	0.1931^{b}	0.001	0.2278	0.0013	0.0001	0.7949	0.5355	0.3198	0.6126
Effective degradability																
Kp = 0.02	36.36^{c}	40.18^{bc}	39.72^{bc}	45.59^{ab}	37.87^{c}	40.73^{abc}	40.11^{bc}	46.56^{a}	0.657	0.5243	0.0023	0.0055	0.9451	0.8942	0.2985	0.7721
Kp = 0.05	33.35^{c}	37.24^{bc}	36.80^{c}	42.60^{ab}	34.89^{c}	37.66^{bc}	37.11^{bc}	43.62^{a}	0.608	0.5074	0.0013	0.0030	0.9364	0.8986	0.2621	0.7126
Kp = 0.08	31.10^{b}	34.99^{b}	34.56^{b}	40.27^{a}	32.64^{b}	35.32^{b}	34.81^{b}	41.33^{a}	0.573	0.4987	0.0008	0.0020	0.9296	0.9061	0.2359	0.6656

[a-d] Means in each row with different superscript letters have significant differences (P<0.05).

[1] Experimental treatments: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme.

[2] A: Effect of temperature; B: Effect of sodium metabisulfite addition; C: Effect of protease enzyme addition; AB: Interaction effect between factors A and B; AC: Interaction effect between factors A and C; BC: Interaction effect between factors B and C; ABC: Interaction effect of three factors A, B, and C.

جدول ۴- اثر فرآوری پر خام بر بخش‌های مختلف پروتئین (گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) بر اساس معادلات AFRC

Table 4. Effect of raw feather processing on protein fractions (g/100gDM) based on AFRC equations

Fractions	Experimental treatments[1]								SEM	*P*-value[2]						
	1	2	3	4	5	6	7	8		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Quickly degradable protein	13.50 ^{b}	16.17^{b}	15.23^{b}	19.28^{a}	14.54^{b}	15.72^{b}	15.49^{b}	20.06^{a}	0.319	0.5326	0.0002	0.0011	0.7073	0.8626	0.0802	0.4394
Slowly degradable protein	18.70	18.94	19.30	21.40	19.31	20.22	20.31	21.07	0.405	0.4394	0.2335	0.1495	0.8349	0.7137	0.6035	0.5464
Rumen degradable protein	32.19^{c}	35.11^{bc}	34.53^{c}	40.68^{ab}	33.86^{c}	35.93^{abc}	35.80^{abc}	41.13^{a}	0.618	0.4083	0.0042	0.0078	0.7411	0.8794	0.2083	0.9962
Effective rumen degradable protein	29.49^{b}	31.88^{ab}	31.48^{b}	36.82^{a}	30.95^{b}	32.79^{ab}	32.70^{ab}	37.12^{a}	0.568	0.4064	0.0072	0.0113	0.7508	0.8535	0.2410	0.9343
Undegradable dietary protein	56.31^{a}	52.26^{abc}	52.41^{abc}	48.52^{bc}	55.52^{a}	52.29^{abc}	53.45^{ab}	47.19^{c}	0.589	0.8238	0.0020	0.0064	0.7458	0.9209	0.5502	0.5078
Digestible undegradable protein	37.37^{ab}	34.35^{bc}	34.69^{bc}	30.81^{c}	43.27^{a}	40.76^{ab}	39.57^{ab}	36.86^{bc}	0.684	0.0006	0.0414	0.0224	0.7654	0.8043	0.8477	0.9066
Metabolizable protein	56.17^{b}	54.68^{b}	54.76^{b}	54.29^{b}	62.10^{a}	61.66^{a}	60.42^{a}	60.52^{a}	0.452	0.0001	0.3876	0.1457	0.8436	0.6022	0.5059	0.9112

$^{a-d}$ Means in each row with different superscript letters have significant differences (P<0.05).

[1] Experimental treatments: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme.

[2] A: Effect of temperature; B: Effect of sodium metabisulfite addition; C: Effect of protease enzyme addition; AB: Interaction effect between factors A and B; AC: Interaction effect between factors A and C; BC: Interaction effect between factors B and C; ABC: Interaction effect of three factors A, B, and C.

جدول ۵- اثر فرآوری پر خام بر بخش‌های مختلف پروتئین بر اساس سیستم نورفور

Table 5. Effect of raw feather processing on protein fractions based on NorFor system

Fractions	Experimental treatments[1]								SEM	*P*-value[2]						
	1	2	3	4	5	6	7	8		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Crude protein (CP) (g/kgDM)	885.1	873.8	869.4	892.0	893.7	882.2	892.5	883.1	3.605	0.2934	0.7435	0.9383	0.2807	0.9221	0.2291	0.2875
Soluble crude protein (SCP) (g/kgCP)	74.4^{e}	119.9^{b}	97.9^{d}	135.2^{a}	79.3^{e}	124.3^{b}	107.2^{c}	136.4^{a}	1.035	0.0292	0.0001	0.0001	0.3163	0.8897	0.0104	0.3704
CP (PdCP) Potential degradable (g/kgCP)	110.83^{c}	151.98^{ab}	133.63^{bc}	160.97^{ab}	109.74^{c}	175.24^{a}	150.21^{ab}	153.08^{ab}	4.234	0.3699	0.0008	0.1534	0.9972	0.6921	0.0362	0.1636
Soluble + potential degradable CP (g/kgCP)	185.23^{c}	271.88^{ab}	231.53^{b}	296.17^{a}	189.04^{c}	299.57^{a}	257.41^{ab}	289.48^{a}	4.914	0.2157	0.0001	0.0047	0.8279	0.7582	0.0212	0.1703
Degradation rate of CP (KdCP) (%/h)	0.1609^{c}	0.1708^{bc}	0.1781^{b}	0.1908^{a}	0.1681^{bc}	0.1738^{b}	0.1791^{b}	0.1931^{b}	0.001	0.2278	0.0013	0.0001	0.7949	0.5355	0.3198	0.6126

$^{a-d}$ Means in each row with different superscript letters have significant differences (P<0.05). [1] Experimental treatments: 1) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 2) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 3) Raw feathers autoclaved at 120°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 4) Raw feathers autoclaved 120°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme, 5) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 6) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 7) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure, 0.15% protease enzyme, 8) Raw feathers autoclaved at 100°C and 2 kPa pressure for 20 minutes, 0.25% sodium metabisulfite, 0.15% of protease enzyme.

[2] A: Effect of temperature; B: Effect of sodium metabisulfite addition; C: Effect of protease enzyme addition; AB: Interaction effect between factors A and B; AC: Interaction effect between factors A and C; BC: Interaction effect between factors B and C; ABC: Interaction effect of three factors A, B, and C.

فهرست منابع

Aderibigbe, A., & Church, D. (1983). Feather and hair meals for ruminants. I. Effect of degree of processing on utilization of feather meal. *Journal of Animal Science*, *56*(5), 1198-1207. doi: 10.2527/jas1983.5651198x

AFRC. (1995). Energy and Protein Requirements of Ruminants: an Advisory Manual Prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients. CAB International: Wallingford, UK.

Alzueta, C., Caballero, R., Rebole, A., Trevino, J., & Gil, A. (2001). Crude protein fractions in common vetch (Vicia sativa L.) fresh forage during pod filling. *Journal of Animal Science*, *79*(9), 2449–2455. doi: 10.2527/2001.7992449x

Association of Official Analytical (AOAC) (1990). Official Methods of Analysis, Edited by KennethHelrich, 15th edition. USA.

Bampidis, V., & Robinson, P. (2006). Citrus by-products as ruminant feeds: A review. *Animal Feed Science and Technology*, *128*(3-4), 175-217.doi: 10.1016/j.anifeedsci.2005.12.002

Bielorai, R., Iosif, B., Neumark, H., & Alumot, E. (1982). Low nutritional value of feather-meal protein for chicks. *The Journal of Nutrition*, *112*(2), 249-254. doi: 10.1093/jn/112.2.249

Blasi, D., Klopfenstein, T., Drouillard, J., & Sindt, M. (1991). Hydrolysis time as a factor affecting the nutritive value of feather meal and feather meal-blood meal combinations for growing calves. *Journal of Animal Science*, *69*(3), 1272-1278. doi: 10.2527/1991.6931272x

Bockle, B., & Muller, R. (1997). Reduction of disulfide bonds by Streptomyces pactum during growth on chicken feathers. *Applied and Environmental Microbiology*, *63*(2), 790-792. doi: 10.1128/aem.63.2.790-7921997

Cozzi, G., Andrighetto, I., Berzaghi, P., & Andreoli, D. (1995). Feather and blood meal as partial replacer of soybean meal in protein supplements for sheep. *Small Ruminant Research*, *15*(3), 239-245. doi: 10.1016/0921-4488(94)00029-7

Davies, S. J., Gouveia, A., Laporte, J., Woodgate, S. L., & Nates, S. (2009). Nutrient digestibility profile of premium (category III grade) animal protein by-products for temperate marine fish species (European sea bass, gilthead sea bream and turbot). *Aquaculture Research*, *40*(15), 1759-1769. doi: 10.1111/j.1365-2109.2009.02281.x

Elmayergi, H., & Smith, R. (1971). Influence of growth of Streptomyces fradiae on pepsin-HCl digestibility and methionine content of feather meal. *Canadian Journal of Microbiology*, *17*(8), 1067-1072. doi: 10.1139/m71-169

Eslahi, N., Dadashian, F., & Nejad, N. H. (2013). An investigation on keratin extraction from wool and feather waste by enzymatic hydrolysis. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, *43*(7), 624-648. doi: 10.1080/10826068.2013.763826

Forgács, G. (2012). Biogas production from citrus wastes and chicken feather: pretreatment and co-digestion. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Goedeken, F., Klopfenstein, T., Stock, R., Britton, R., & Sindt, M. (1990). Protein value of feather meal for ruminants as affected by blood additions. *Journal of Animal Science*, *68*(9), 2936-2944. doi: 10.2527/1990.6892936x

Habib, G., Khan, N., Ali, M., & Bezabih, M. (2013). In situ ruminal crude protein degradability of by-products from cereals, oilseeds and animal origin. *Livestock Science*, *153*(1-3), 81-87.

Hosseini, S. A., Alizadeh-Ghamsari, A. H., Zahedifar, M., Roosta Azad, R., & Beikizadeh, H. (2021). Effects of different levels of hydrolyzed feather powder on performance and serum biochemical parameters in Broiler Chickens. *Research on Animal Production*, *12*(33), 36-43. doi: 10.52547/rap.12.33.36 [In Persian]

Kamalak, A., Canbolat, O., Gurbuz, Y., & Ozay, O. (2005). In situ ruminal dry matter and crude protein degradability of plant-and animal-derived protein sources in Southern Turkey. *Small Ruminant Research*, *58*(2), 135-141. doi: 10.1016/j.smallrumres.2004.09.006

Kim, W., Lorenz, E., & Patterson, P. (2002). Effect of enzymatic and chemical treatments on feather solubility and digestibility. *Poultry Science*, *81*(1), 95-98. doi: 10.1093/ps/81.1.95

Li, Q. (2019). Progress in microbial degradation of feather waste. *Frontiers in Microbiology*, *10*, 2717. doi: 10.3389/fmicb.2019.02717

Manczinger, L., Rozs, M., Vágvölgyi, C., & Kevei, F. (2003) .Isolation and characterization of a new keratinolytic Bacillus licheniformis strain. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *19*, 35-39. doi: 10.1023/A:1022576826372

McKinnon, J., Olubobokun, J., Mustafa, A., Cohen, R., & Christensen, D. (1995). Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, *56(3-4),* 243-252.

Mehta, R. S., Jholapara, R. J., & Sawant, C. S. (2014). Isolation of a novel feather-degrading bacterium and optimization of its cultural conditions for enzyme production. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, *6*(1), 194-201 .

Mokrejs, P., Svoboda, P., Hrncirik, J., Janacova, D., & Vasek, V. (2011). Processing poultry feathers into keratin hydrolysate through alkaline-enzymatic hydrolysis. *Waste Management & Research*, *29*(3), 260-267. doi: 10.1177/0734242X10370

Mustafa, A., McKinnon, J., & Christensen, D. (1999). Effect of moist heat treatment on in-vitro degradability and ruminal escape protein and amino acids of mustard meal. *Animal Feed Science and Technology*, *76*(3-4), 265-274. doi: 10.1016/S0377-8401(98)00223-5

Nasri, M. F., France, J., Mesgaran, M. D., & Kebreab, E. (2008). Effect of heat processing on ruminal degradability and intestinal disappearance of nitrogen and amino acids in Iranian whole soybean. *Livestock Science*, *113*(1), 43-51. doi: 10.1016/j.livsci.2007.02.017

Nagaraja, T., & Titgemeyer, E. (2007). Ruminal acidosis in beef cattle: the current microbiological and nutritional outlook. *Journal of Dairy Science*, *90*, E17-E38. doi: 10.3168/jds.2006-478

Nazem, K., Rozbehan, Y., & Shodjaosadati, S. (2008). The nutritive value of citrus pulp (lemon and orange) treated with Neurospora sitophila. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *12*(43), 495-505. [In Persian]

Nocek, J. E. (1988). In situ and other methods to estimate ruminal protein and energy digestibility: a review. *Journal of Dairy Science*, *71*(8), 2051-2069. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(88)79781-7

NRC. (2000). Nutrient requirements of beef cattle. Seventh. In: The National Academies Press, editor. Washington, DC, USA.

Ørskov., E.-R. (2002). Modelling Nutrient Utilization in Farm Animals. *The Veterinary Journal*, *163*(1), 67-67. doi: 10.1053/tvjl.2001.0576

Ørskov, E.-R., & McDonald, I. (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*, *92*(2), 499-503. doi: 10.1017/S0021859600063048

Pedersen, M. B., Yu, S., Plumstead, P., & Dalsgaard, S. (2012). Comparison of four feed proteases for improvement of nutritive value of poultry feather meal. *Journal of Animal Science*, *90*(4), 350-352. doi: 10.2527/jas.53795

Pfeuti, G. (2017). Improving and characterizing the nutritive value of feather meal using rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) as a biological model: Insights into determinants of digestibility of proteins. University of Guelph, Canada.

Pittman, K., & Bryant, M. (1964). Peptides and other nitrogen sources for growth of Bacteroides ruminicola. *Journal of Bacteriology*, *88*(2), 401-410.

Radunz, A., Lardy, G., Bauer, M., Marchello, M., Loe, E., & Berg, P. (2003). Influence of steam-peeled potato-processing waste inclusion level in beef finishing diets: Effects on digestion, feedlot performance, and meat quality. *Journal of Animal Science*, *81*(11), 2675-2685. doi: 10.2527/2003.81112675x

Ramnani, P., & Gupta, R. (2007). Keratinases vis-à-vis conventional proteases and feather degradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *23*, 1537-1540. doi: 10.1007/s11274-007-9398-3

Sancilio, C., & Ruggiero, G. (1991). Intensive animal production and the Community legislation for the protection of the environment. Animal Breeding and Environment Protection, Proceedings of the 3rd Seminar of the second technical section of the Italian Association of Agricultural Engineering, Udine, Italy.

Sniffen, C. J., O'connor, J., Van Soest, P. J., Fox, D. G., & Russell, J. (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, *70*(11), 3562-3577. doi: 10.2527/1992.70113562x

Van Soest, P. (1994). *Nutritional Ecology of The Ruminant* (Vol. 476). Cornell University Press, USA.

Verma, A., Singh, H., Anwar, S., Chattopadhyay, A., Tiwari, K. K., Kaur, S., & Dhilon, G. S. (2017). Microbial keratinases: industrial enzymes with waste management potential. *Critical Reviews in Biotechnology*, *37*(4), 476-491. doi: 10.1080/07388551.2016.1185388

Volden, H. (2011). NorFor—The Nordic feed evaluation system. EAAP Scientific Series.

Wang, X., Shi, Z., Zhao, Q., & Yun, Y. (2021). Study on the structure and properties of biofunctional keratin from rabbit hair. *Materials*, *14*(2), 379. doi: 10.3390/ma14020379

Wrześniewska-Tosik, K., & Adamiec, J. (2007). Biocomposites with a content of keratin from chicken feathers. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, *15*(1), 60.

Yamamura, S., Morita, Y., Hasan, Q., Yokoyama, K., & Tamiya, E. (2002). Keratin degradation: a cooperative action of two enzymes from Stenotrophomonas sp. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *294*(5), 1138-1143. doi: 10.1016/S0006-291X(02)00580-6

Yu, P. (2005). Protein secondary structures (α-helix and β-sheet) at a cellular level and protein fractions in relation to rumen degradation behaviours of protein: a new approach. *British Journal of Nutrition*, *94*(5), 655-665.

Zarnegar, Z., Ebrahimi, S., Samadpour, M., Sheykholeslami, S. M. A., & Ebrahimi, S. H. (2018). Production performance of lactating Holstein dairy cows fed feather meal as major protein source. The Second National Congress on Advanced Research in Animal Sciences, Iran. [In Persian]