The University of Tehran Press

Iranian Journal of Animal Science

Online ISNN: 2008-4773

Homepage: http:// ijas.ut.ac.ir/

Effects of Combined Processing with Electron Beam Irradiation and Liquid Culture of Aspergillus oryzae on Chemical Composition, Gas Production, and Ruminal Degradability of Wheat Straw

Hadi Adanvar [1], Hamed Khalilvandi-Behroozyar [2]✉, YounesAli Alijoo[3], Alireza Bayat [4], Abdollah Ahmadpour[5]

1. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: h.adanvar@urmia.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: h.khalilvandi@urmia.ac.ir,
3. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: y.alijoo@urmia.ac.ir
4. Animal Nutrition, Production Systems, Natural Resources Institute Finland (Luke), FI-31600 Jokioinen, Finland, alireza.bayat@luke.fi
5. Higher Education Centre of Shahid Bakeri, Urmia University, Miyandoab, Iran. a.ahmadpour@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 10 February 2026

Received in revised form: 23 May 2026

Accepted: 24 May 2026

Published online: Atumn 2026

Keywords:

Agro-industrial Wastes; Fungal Enzymes; clean processing; iNDF; Nutritive Value.

ABSTRACT

Processing of lignocellulosic feeds with electron beam irradiation and fungal fermentation can improve fiber availability. This study examined the synergistic effects of electron beam irradiation and an *Aspergillus oryzae* liquid culture extract on wheat straw. Treatments included irradiation at 200, 300, or 400 kGy before (first set) or after (second set) fungal extract application. The chemical composition of the control treatment (unprocessed) and the six other treatments was determined according to standard methods, and the contents of neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and indigestible NDF after 240 h of incubation ($iNDF_{240}$) were measured using an ANKOM system and the filter bag technique. Gas production and ruminal degradability of dry matter and NDF were determined. A completely randomized design was used for statistical analysis, and data were analyzed using SAS 9.4. As irradiation dose increased, the contents of DM recovery, NDF, and ADF in all treatments decreased significantly compared to the control ($P < 0.05$), and this reduction was greater in the pre-irradiated treatments. With increasing incubation time, cumulative gas production and ruminal degradability of DM and NDF increased markedly ($P < 0.05$). For all treatments, a very strong correlation was observed between gas production and ruminal degradability. Overall, the combination of 400 kGy electron beam irradiation prior to fungal processing showed the best performance, and its application could be a promising approach to improving the nutritional value of wheat straw.

Cite this article: Adanvar, H., Khalilvandi-Behroozyar, H., Alijoo, Y. A., Bayat, A.R. & Ahmadpour, A. (2026). Effects of Combined Processing with Electron Beam Irradiation and Liquid Culture of Aspergillus oryzae on Chemical Composition, Gas Production, and Ruminal Degradability of Wheat Straw. *Iranian Journal of Animal Science*, 57 **(**3**),** 473-495. DOI: https://doi.org/10.22059/ijas.2026.410722.654127

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijas.2026.410722.654127

Extended Abstract

Introduction

In ruminant nutrition, *lignin* in the plant cell wall restricts the access of ruminal enzymes to *cellulose* and *hemicellulose*, thereby reducing fiber digestibility. Various physical, chemical, biological, or combined treatments have been employed to overcome this limitation. Electron-beam irradiation, as a physical pretreatment method for lignocellulosic materials, is capable of disrupting *lignin* structures, depolymerizing *cellulose* crystals, and converting *hemicellulose* into soluble fractions. Fermentation with the liquid-state culture of *Aspergillus oryzae*, as a biological processing technique, not only supplies fibrolytic enzymes but also enhances the population of cellulolytic bacteria, thereby improving fiber bioavailability and the nutritional value of the substrate.

Materials and Methods

The experimental treatments consisted of untreated wheat straw as the control, three combined treatments in which electron-beam irradiation at 200, 300, or 400 kGy was applied prior to fermentation with the liquid-state extract of Aspergillus oryzae (first treatment category), and three additional treatments in which the order of processing was reversed (second treatment category). Electron-beam irradiation was performed at the Iran Radiation Processing Center (Yazd, Iran) using a Rhodotron electron accelerator to achieve the desired absorbed doses.For the biological processing, the fungal fermentation extract was prepared after 9 days of incubation in a liquid medium containing 50% potato extract and 50% straw extract, supplemented with 20 g of sugar and 3 g of wheat bran per liter, at 28°C. Ground samples (1-mm sieve) were oven-dried at 60°C for 24 h. Ruminal fluid and nylon bags for in situ incubations were obtained using three rumen-fistulated, two-year-old Qezel rams.Dry matter, organic matter, and crude protein were analyzed according to standard procedures (AOAC, 2000). Neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) were determined using the filter bag system (Komarek, 1994) with an Ankom fiber analyzer following the method of Van Soest *et al.* (1991). To determine indigestible neutral detergent fiber (iNDF), 0.5 g of samples were weighed into F57 filter bags and incubated for 240 hours in a mixture of rumen fluid and buffer (1:4 ratio) at 39°C under anaerobic conditions (Goering & Van Soest, 1970). After incubation, the bags were washed with hot water, and the residual material was treated with neutral detergent according to the method of Van Soest *et al.* (1991). The residue was considered as iNDF. Gas production parameters were measured according to the procedure described by Fedorak and Hrudey (1983). In situ dry matter and NDF degradability were evaluated following the standardization guidelines of Vanzant *et al.* (1998).

A completely randomized design was used to assess the effects of treatments on chemical composition, correlation coefficients, and estimated kinetic parameters, analyzed using the General Linear Model (GLM) procedure of SAS 9.2. Mean comparisons were performed using Tukey's test at the 0.95 confidence level. For gas production and in situ degradability data, the MIXED procedure with a first-order covariance structure was applied. Results are presented as least square means with their corresponding standard errors.

Results and discussion

With increasing irradiation dose, the contents of dry matter, organic matter, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, and undegraded NDF at 240 h of the processed treatments decreased significantly compared with the control ($P < 0.05$). These reductions were more pronounced in the first treatment category (irradiation prior to fermentation) than in the second category (irradiation after fermentation). Treatments in the first category also produced higher cumulative gas volumes and exhibited greater improvements in the potentially degradable fraction and degradation rate.

The kinetics and parameters of dry matter degradability (DMD) were significantly affected by the combined processing and its sequence. At all incubation times and in both processing orders, DMD in the treatments irradiated at 300 and 400 kGy was significantly higher than the control ($P < 0.05$). These improvements were associated with increases in the potentially degradable fraction, degradation rate, and effective DMD at a passage rate of 2% per hour. Neutral detergent fiber degradability (NDFD) increased as ruminal incubation time progressed, and except for the 200-kGy treatments up to the 24-h incubation point, all processed treatments showed significantly greater NDFD than the control across all incubation times ($P < 0.05$). Moreover, in all treatments, cumulative gas production exhibited a strong and positive correlation with both DMD and NDFD. The findings indicated that *in vitro* gas production has considerable potential for predicting ruminal DMD and NDFD.

Conclusion

The combination of electron-beam irradiation and biological processing with *Aspergillus oryzae* can serve as an effective strategy to enhance the degradability of dry matter and neutral detergent fiber in wheat straw. However, treatment responses may vary, and further research is needed to optimize irradiation dose and the

culture conditions used for producing fungal enzymes before practical application is feasible. Consideration must also be given to limitations such as the cost and technical requirements of irradiation facilities, the prolonged duration of biological processing, and the overall complexity of the procedure. Therefore, future studies should focus on optimizing this approach for on-farm application and assessing its long-term effects on rumen health and animal performance.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, review, and analysis of the article, and to the writing of initial and subsequent drafts, and approved the final version for submission.

Data Availability Statement

Data will be available upon reasonable request.

Acknowledgements:

Authors would like to thanks Dam zist Kara company for their assistance and provide animals for this study.

Ethical considerations

All animal procedures were conducted with the approval of the Animal Care and Use Committee of Urmia University (Approval No. IR3 4534) in line with the Iranian Council of Animal Care. The study followed ARRIVE guidelines for reporting in vivo experiments, and all experimental methods adhered to the applicable regulations and standards. Research involving plants, whether cultivated or wild, including the collection of plant samples, was performed in accordance with relevant institutional, national, and international rules and guidelines.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

انتشارات دانشگاه تهران

نشریه علوم دامی ایران، دوره ۵۷، شماره ۳

شاپا الکترونیکی: ۷۹۴۹-۲۴۲۳

Homepage: http://ijas.ut.ac.ir//

تأثیر فرآوری توأم با پرتوهای الکترونی و کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا بر ترکیب شیمیایی، تولید گاز و تجزیه پذیری شکمبه ای کاه گندم

هادی عدن ور[۱] | حامد خلیل وندی بهروزیار[۲] ✉ | یونس علی علی جو[۳] | علیرضا بیات[۴] | عبداله احمدپور[۵]

۱. گروه علوم دامی،دانشکده کشاورزی،دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: hadi.adanvar@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم دامی،دانشکده کشاورزی،دانشگاه ارومیه. ارومیه، ایران. رایانامه: h.khalilvandi@urmia.ac.ir

۳. گروه علوم دامی،دانشکده کشاورزی،دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: y.alijoo@urmia.ac.ir

۴. گروه پژوهشی تغذیه و پرورش دام،موسسه تحقیقات منابع طبیعی فنلاند، فنلاند. رایانامه: alireza.bayat@like.fi

۵. مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب،دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: a.ahmadpour@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:

ضایعات کشاورزی-صنعتی، آنزیم‌های قارچی، فرآوری پاک، فیبر گوارش‌ناپذیر، ارزش تغذیه‌ای.

چکیده

فرآوری خوراک‌های لیگنوسلولزی با پرتوهای الکترونی و تخمیر قارچی، می‌تواند قابلیت دسترسی به الیاف را بهبود بخشد. در این مطالعه، اثرات هم‌افزایی پرتودهی الکترونی و عصاره حاصل از کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا بر کاه گندم بررسی شد. در سه تیمار دسته اول، ابتدا کاه گندم در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ گیلوگری پرتودهی و سپس با عصاره قارچی فرآوری شد و در سه تیمار دسته دوم، فرآوری با عصاره قارچی قبل از پرتودهی انجام شد. ترکیب شیمیایی تیمار شاهد (بدون فرآوری) و شش تیمار دیگر بر اساس روش‌های استاندارد و مقادیر الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی و الیاف گوارش ناپذیر پس از ۲۴۰ ساعت انکوباسیون ($iNDFD_{240}$) با استفاده از دستگاه آنکوم و روش فیلتربگ تعیین گردید. مقادیر تولید گاز و تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی تعیین گردید. تجزیه آماری در قالب طرح کاملا تصادفی با نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت. با افزایش دز پرتودهی، بازده ماده خشک، الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی همه تیمارها نسبت به شاهد به طور معنی‌داری کاهش نشان داد ($P<۰/۰۵$) و این کاهش در تیمارهای پرتودهی پیشین بیشتر بود. با افزایش زمان انکوباسیون، تولید تجمعی گاز، تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف به‌طور چشمگیری افزایش نشان داد ($P<۰/۰۵$). برای تمامی تیمارها، همبستگی بسیار قوی تولید گاز با تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای مشخص شد. در مجموع، ترکیب پرتودهی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری پیشین با فرآوری قارچی، بهترین عملکرد را نشان داد و کاربرد آن می‌تواند رویکردی امیدبخش برای ارتقای ارزش تغذیه‌ای کاه گندم محسوب شود.

استناد: عدن ور، هادی؛ خلیل وندی بهروزیار، حامد؛ علی جو، یونس علی؛ بیات، علیرضا و احمدپور، عبداله (۱۴۰۵). تأثیر فرآوری توأم با پرتوهای الکترونی و کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا بر ترکیب شیمیایی، تولید گاز و تجزیه پذیری شکمبه ای کاه گندم. *نشریه علوم دامی ایران*، ۵۷ (۳)، ۴۹۵-۴۷۳. DOI: https://doi.org/10.22059/ijas.2026.410722.654127

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijas.2026.410722.654127

مقدمه

نشخوارکنندگان، جمعیت پیچیده و کارآمدی از میکروارگانیسم‌ها را در شکمبه دارند که مجموعه‌ای از آنزیم‌های تخصصی را برای تخریب پلی‌ساکاریدهای ساختاری دیواره سلول گیاهی تولید می‌کنند (Rosser *et al.*, ۲۰۲۲). بااین‌حال، حضور لیگنین به عنوان یک مانع فیزیکی مؤثر، دسترسی آنزیم‌های میکروبی به سلولز و همی‌سلولز را محدود کرده و فرآیند هیدرولیز و در نهایت قابلیت هضم فیبر را کاهش می‌دهد (Moore & Jung, ۲۰۰۱) که نیازمند توسعه روش‌هایی برای لیگنین‌زدایی و افزایش دسترسی آنزیمی و در نهایت بهبود کارایی استفاده از فیبرعلوفه‌ای و انرژی آن است (Adesogan *et al.*, ۲۰۱۹).

در این راستا، طیف گسترده‌ای از روش‌های فیزیکی (از جمله خرد کردن، پلت کردن، آسیاب، خیساندن، بخاردهی و پرتوتابی)، شیمیایی (مانند استفاده از سدیم هیدروکسید، اوره، آمونیاک، اکسید کلسیم و پراکسید هیدروژن) و زیستی (شامل قارچ‌ها، میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های تجاری) و یا ترکیب آن‌ها برای اصلاح ساختار لیگنوسلولزی به‌کار گرفته شده است (Bouchard *et al.*, ۲۰۰۶; Sarnklong *et al.*, ۲۰۱۰). روش‌های شیمیایی علیرغم سادگی در روش، موجب ورود مواد به طبیعت و ایجاد آلایندگی‌های زیست محیطی می شود (Cone *et al.*, ۲۰۱۰). در مقابل، روش‌های فیزیکی و زیستی به دلیل ایمنی بیشتر و سازگاری بهتر با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این فرآوری‌ها، افزایش حلالیت لیگنین یا تضعیف پیوندهای لیگنین–کربوهیدرات است تا سلولز و همی‌سلولز برای میکروب‌های شکمبه قابل دسترس‌تر شده و مصرف اختیاری و قابلیت هضم افزایش یابد (Sarnklong *et al.*, ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر استفاده از آنزیم‌ها و قارچ‌ها در فرآوری زیست‌توده لیگنوسلولزی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از فناوری‌های نوین در این زمینه، تخمیر غوطه‌ور است که امکان تولید مستقیم ترکیبات زیست‌فعال و آنزیم‌های اختصاصی را در محیط مایع فراهم می‌کند (Xv *et al.*, ۲۰۲٤). با وجود مطالعات جداگانه در زمینه اثرات مثبت پرتودهی الکترونی (Bak, ۲۰۱۴; Bak *et al.*, ۲۰۰۹; Kim *et al.*, ۲۰۱۴) و فرآوری قارچی (Saghebi et al., ۲۰۲۳) بر بهبود قابلیت هضم الیاف، کاربرد توأم این روش‌ها محدود بوده است. در مطالعات اخیر، اثرات هم‌افزایی کاربرد همزمان چند روش فرآوری بر زیست‌فراهمی سلولز اثبات شده است (Zheng et al., ۲۰۲۰). بنابراین با فرض القای بی‌نظمی ساختاری و ایجاد تخلخل و سطح ویژه‌ی بیشتر توسط پرتودهی و توانایی آنزیم های پیچیده قارچی در تجزیه ساختارهای دیواره سلولی، انتظار می‌رود اثرات مضاعفی درکاربرد توام این دو روش مشاهده گردد. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثرات هم‌افزایی فرآوری توام با پرتوهای الکترونی و عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا در دو ترتیب فرآوری متفاوت بر ترکیب شیمیایی، فراسنجه‌های تولید گاز و تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای کاه گندم طراحی و اجرا گردید.

پیشینه پژوهش:

مطالعات گسترده نشان داده‌اند که پرتوتابی الکترونی (EBI) به‌عنوان یک روش فرآوری مؤثر، با ایجاد شکست در ساختار لیگنین، دپلیمریزاسیون و کاهش نظم ساختاری (Alberti e*t al.*, ۲۰۰۵; Kasprzyk *et al.*, ۲۰۰۴) و تبدیل بخشی از همی‌سلولز به اجزای محلول، موجب افزایش تخلخل سطحی و بهبود تجزیه‌پذیری دیواره سلولی می‌شود (Bak, ۲۰۱۴; Bak *et al.*, ۲۰۰۹; Kim *et al.*, ۲۰۱۴). شدت این تغییرات با افزایش دز پرتودهی، همبستگی مثبت نشان داده است (Shahbazi *et al.*, ۲۰۰۸). کاهش همزمان وزن مولکولی و درصد سلولز آلفا، موجب افزایش نفوذپذیری آنزیمی به نواحی کریستالی می‌گردد (Driscoll *et al.*, ۲۰۰۹) که می‌تواند نیاز به استفاده از مکمل های آنزیمی در تولید خوراک دام را کاهش دهد (Kapoor *et al.*, ۲۰۲۳). پرتوهای پرانرژی، واکنش‌های شیمیایی و شکستن پیوند بین پلیمرهای لیگنوسلولزی را با ایجاد یون‌ها و رادیکال‌های آزاد آغاز می‌کند (Cheng & Kerluke, ۲۰۰۳) و موجب ورود پلیمرهای نامحلول از بخش غیرقابل تجزیه و کندتجزیه به بخش سریع‌تجزیه می‌شود (Shawrang *et al.*, ۲۰۰۸).

از سوی دیگر، فرآوری زیستی توده لیگنوسلولزی توسط قارچ‌ها به‌عنوان راهکاری کارآمد مطرح است. این فرآیند مبتنی بر همکوشی پیچیده‌ای از آنزیم‌های اکسیدوردوکتاز است که در پاسخ به ساختارهای دیواره سلولی و مواد مغذی موجود ترشح

1. Crystallinity

می‌شوند (Hatakka & Hammel, 2011). قارچ آسپرژیلوس اورایزا (A.Or) به عنوان یکی از گونه‌های مهم آسکومیست‌ها است که ژنوم آن با دارا بودن ۵۰۰ ژن کد کننده آنزیم‌های فعال کربوهیدراتی شامل خانواده‌های گلیکوزید هیدرولاز، گلیکوزیل ترانسفراز، پلی ساکارید لیاز و کربوهیدرات استراز (Matsuzawa, 2024)[2]، توانایی بهبود محیط شکمبه را نیز دارد. این بهبود از طریق تقویت فعالیت باکتری‌های سلولولیتیک و نیز تثبیت اسیدیته با تحریک مصرف لاکتات توسط Megasphaera elsdenii و Selenomonas ruminantium رخ می‌دهد (Bertin *et al.*, ۲۰۰۵; Waldrip & Martin, ۱۹۹۳) که در نهایت با افزایش تولید اسیدهای چرب فرار و سنتز پروتئین میکروبی، محیط بهتری را برای فعالیت باکتری‌ها و قارچ‌های هضم‌کننده فیبر فراهم می‌کند (Sun *et al.*, ۲۰۱۷). فرآوری سیلاژ ذرت با قارچ اورایزا منجر به افزایش حجم گاز تولیدی و همچنین مقدار کل اسیدهای چرب فرار شد (Sun *et al.*, ۲۰۱۴) و افزودن همزمان عصاره قارچ آسپرژیلوس اورایزا و آسپرژیلوس نیجر، سبب افزایش قابلیت هضم ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی گردید (Kong *et al.*, ۲۰۲۱). همچنین در مطالعه ثاقبی و همکاران (۲۰۲۲)، فرآوری کاه گندم با کشت مایع و جامد قارچ آسپرژیلوس اورایزا باعث کاهش ماده خشک، ماده آلی، الیاف نامحلول در شوینده خنثی و افزایش حجم گاز تولیدی برون‌تنی و تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک در نرخ عبور ۲ درصد گردید (Saghebi *et al.*, ۲۰۲۳). ون‌هورن و همکاران افزایش قابلیت هضم ظاهری ماده آلی در شکمبه را با افزودن آسپرژیلوس اوریزا به جیره گاوهای شیری گزارش کردند (Van Horn *et al.*, ۱۹۷۹). علاوه بر این، مکمل پری‌بیوتیک اورایزا با کاهش سطح استرس، عملکرد سیستم ایمنی را تقویت کرده است (Sangale & Kalita, ۲۰۲۵). در پژوهش‌های اخیر، از ترکیب آسیاب مکانیکی، پرتوتابی UV و فرآوری قارچی با Trametes versicolor استفاده شد. تحلیل‌های FTIR[3] و SEM[4] نشان داد که پرتوتابی باعث تخریب پیوندهای آروماتیک لیگنین شده و تیمار بیولوژیکی، تجزیه سلولز را تسریع کرده است که در نهایت بازده تجزیه آنزیمی سلولز بیش از ۶۰٪ افزایش یافت (Zheng *et al.*, 2020).

روش شناسی پژوهش

این پژوهش از پاییز ۱۴۰۲ تا تابستان ۱۴۰۳ در مزرعه آموزشی- پژوهشی و آزمایشگاه‌های گروه علوم دامی دانشگاه ارومیه و مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب انجام شد. مدیریت دام‌ها مطابق دستورالعمل‌های نگهداری و استفاده از حیوانات مزرعه‌ای صورت گرفت (FASS, ۲۰۱۰). مایع شکمبه مورد نیاز آزمون تولید گاز و تعیین فراسنجه‌های شکمبه‌ای از سه رأس گوسفند نر دو ساله نژاد قزل (۲ ± ۵۲ کیلوگرم وزن زنده) دارای فیستولای شکمبه‌ای، پیش از وعده خوراک‌دهی صبحگاهی جمع‌آوری شد. دام‌ها به‌صورت انفرادی نگهداری شده و به‌منظور تثبیت جمعیت میکروبی شکمبه، به مدت ۱۵ روز با جیره کاملاً مخلوط حاوی ۷۰٪ علوفه (یونجه و کاه گندم) و ۳۰٪ مواد متراکم (دانه جو و کنجاله سویا)، معادل ۱۰٪ بیشتر از سطح نگهداری و مطابق توصیه‌های NRC (2007)، در دو وعده مساوی روزانه تغذیه شدند. دام‌ها در طول دوره آزمایش دسترسی آزاد به آب آشامیدنی و مکمل‌های معدنی و ویتامینی داشتند.

نمونه‌های کاه گندم از مزارع حاجی‌کرد (مراغه) جمع‌آوری، در سایه خشک و به آزمایشگاه منتقل شد. شش تیمار آزمایشی مطابق جدول ۱ طراحی شد: سه تیمار پرتوتابی پیشین که در آن کاه ابتدا با دزهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری پرتودهی و سپس با عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا فرآوری شد و سه تیمار پرتوتابی پسین که ترتیب فرآوری معکوس و پرتودهی پس از تیمار آنزیمی انجام گرفت. جدایه آسپرژیلوس اورایزا (ATCC 9376) از مرکز کلکسیون میکروارگانیسم‌های صنعتی ایران تهیه و زیر هود لامینار و در مجاورت چراغ الکلی روی پتری‌دیش‌های پلاستیکی حاوی محیط کشت استریل سیب‌زمینی دکستروز آگار (PDA کد ۱۱۰۱۳۰ مرک، آلمان) انتقال داده شد و به مدت ۴ روز در انکوباتور ۲۸ درجه سانتی‌گراد مطابق دستورالعمل‌های مربوطه نگهداری شد تا زمانیکه بیشتر سطح پلیت از میسلیوم قارچی پوشیده شد (Van Kuijk *et al.*, 2015).

---

1. Aspergillus oryzae
2. Carbohydrate-active enzymes
3. Fourier Transform Infrared Spectroscopy
4. Scanning Electron Microscopy

عصاره سیب‌زمینی با جوشاندن ۲۰۰ گرم سیب‌زمینی نگینی‌شده در آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه تهیه و پس از صاف‌کردن، حجم آن با آب مقطر استریل به یک لیتر رسانده شد. به‌منظور شبیه‌سازی محیط کشت حاوی سوبسترا، عصاره کاه گندم–جو با غوطه‌ورسازی ۸۰ گرم مخلوط کاه در یک لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت تهیه گردید. هر لیتر محیط کشت مایع نهایی درون شیشه های ۱/۵ لیتری شامل مخلوط مساوی عصاره سیب‌زمینی و عصاره کاه، همراه با ۲۰ گرم قند و ۳ گرم سبوس گندم، پس از اتوکلاو ۲۰ دقیقه‌ای بود که با اضافه کردن جدایه قارچی تکثیر شده در پتری‌دیش ۸ سانتی‌متری تلقیح شد و به مدت ۹ روز در شیکر انکوباتور (۲۸ °C ، ۱۰۰ دور/دقیقه) نگهداری شد (Rodrigues *et al.*, ۲۰۰۸). سپس محیط به مدت ۲۰ دقیقه در ۶۰۰ دور/دقیقه سانتریفیوژ و عصاره عاری از سلول تهیه شد. سوبسترای کاه گندم پس از خرد شدن (≈۱ سانتی‌متر) و غوطه‌وری ۱۲ ساعته در آب، در بسته‌های ۰/۵ کیلوگرمی و طی دو مرحله ۳۰ دقیقه‌ای در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ اتمسفر اتوکلاو شد. پس از خنک شدن، به هر بسته، ۳۰۰ میلی‌لیتر عصاره سانتریفیوژ شده افزوده و تیمارها به مدت ۹ روز در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک و برای انجام آزمایش‌های بعدی درون کیسه های زیپ‌دار بسته‌بندی گردید (AOAC, 2000).

جدول ۱- تیمارهای آزمایشی کاه گندم شاهد و فرآوری شده فیزیکی و زیستی با ترتیب های مختلف

Table 1 - Experimental treatments of control, physically and biologically treated wheat straw in different orders.

Treatments description	Treatments name
تیمار شاهد یا کاه گندم فرآوری نشده	Control
پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا	200A.or
پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا	300A.or
پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا	400A.or
عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری	A.Or200
عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری	A.Or300
عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری	A.Or400

بسته های ۵۰۰ گرمی کاه گندم با دزهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری به‌وسیله شتاب‌دهنده الکترونی رودوترون[1](TT220) در مرکز پرتوفرآیند ایران مرکزی (یزد) پرتودهی شدند. پرتودهی به‌صورت یک‌طرفه انجام و برای دستیابی به دز مورد نظر، نمونه‌ها حسب نیاز چندین بار در معرض پرتو قرار گرفتند. دز دریافتی با استفاده از کالری‌متر پلی‌استایرن به‌عنوان دزیمتر مرجع تأیید شد. نمونه شاهد بدون پرتودهی تهیه گردید، به‌طوری‌که کلیه مراحل آماده‌سازی مشابه تیمارها، به‌جز پرتودهی و تیمار آنزیمی، اعمال شد.

تیمارهای آزمایشی پس از آسیاب شدن با الک یک میلی‌متری، در سه تکرار از نظر بازده ماده خشک[2]، ماده آلی و پروتئین خام به روش‌های استاندارد (AOAC, 2000) ارزیابی شد و الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی با روش فیلتربگ و دستگاه اتوماتیک آنکوم بر اساس روش ون‌سوست و همکاران (۱۹۹۱) تعیین شد (Van Soest *et al.*, 1991). برای تعیین فیبر گوارش‌ناپذیر (iNDF)، ۰/۵ گرم از نمونه‌ها در کیسه‌های فیلتر F57 توزین شده و به مدت ۲۴۰ ساعت در مخلوط شیرابه شکمبه و بافر (نسبت ۱ به ۴) و در دمای ۳۹ درجه سلسیوس تحت شرایط بی‌هوازی انکوبه شدند (Goering & Van Soest, 1970). پس از انکوباسیون، کیسه‌ها با آب داغ شسته شده و بقیه‌ی ماده با شوینده خنثی به روش ون‌سوست و همکاران (Van Soest *et al.*, 1991) تیمار شد. باقی‌مانده مواد به عنوان iNDF در نظر گرفته شد.

به‌منظور ارزیابی اثر فرآوری بر توان تولید گاز تیمارها، از روش تولید گاز فدوراک و هرودی (۱۹۸۳) در سه سری[3] مستقل و با سه تکرار برای هر تیمار استفاده شد (Fedorah & Hrudey, 1983). مایع شکمبه اخذ شده پس از همگن‌سازی برای

1. Rodotron TT220
2. DMrecovery = (DM remaining / DM initial) × 100
3. Run

اطمینان از حضور همه میکروارگانیسم‌ها و صاف کردن توسط پارچه کتان ۴ لایه ، با بافر تهیه شده بر اساس روش منک و همکاران (۱۹۷۹) و روش اصلاح شده منک و استینگاش به نسبت ۱:۲ مخلوط گردید (Menke *et al*., 1979; Menke & steingass, 1988). مقدار ۵۰۰ میلی‌گرم از هر تیمار آسیاب شده (الک ۱ میلی‌متری) توزین و در ویال‌های شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری استریل اضافه و ۵۰ میلی‌لیتر از مخلوط مایع شکمبه–بافر به آن افزوده شد. دهانه ویال‌ها پس از تخلیه هوا با گاز CO_2، توسط رابر لاستیکی و سیلک آلومینیومی پرس شد و سپس در دمای ۳۹ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. برای هر سری، ویال‌های بلانک به‌منظور تصحیح گاز تولیدی در نظر گرفته شد. حجم گاز تولیدی در زمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعت ثبت گردید. همچنین، قابلیت هضم ماده خشک و ماده آلی با انکوباسیون ۲۴ ساعته و سه تکرار برای هر تیمار در ویال‌های مجزا به‌طور همزمان تعیین شد. فراسنجه‌های تولید گاز با استفاده از نرم افزار Fitcurve و رابطه غیر خطی ارسکوف و مکدونالد (۱۹۷۹) به صورت $P=A(1-e^{-Ct})$ تعیین شد که در آن P: میلی لیترحجم گاز تولیدی در زمان t به ازای هر گرم ماده خشک، A: پتانسیل تولید گاز (میلی لیتر به ازای هر گرم ماده خشک) C: ثابت نرخ تولید (h^{-1}) و e عدد نپر است (Ørskov & McDonald, 1979). مقادیر ماده آلی قابل هضم (OMD)، انرژی قابل متابولیسم (ME) و انرژی خالص شیردهی (NEL)، با استفاده از روابط پیشنهاد شده منک و استینگاش (Menke & steingass, 1988)، کل مواد مغذی قابل هضم (TDN) مطابق با رابطه (NRC, 2007) و مقادیر اسیدهای چرب کوتاه زنجیر (SCFA) با استفاده از روش (Getachew *et al*., 2002) محاسبه شد:

رابطه ۱) TDN(%)=81.38+0.36 CP-0.77 ADF

رابطه ۲) NEL(Mj/Kg DM)=(0.0245 TDN-0.12)*4.184

رابطه ۳) ME(Mj/Kg DM)=2.2+0.136 GP+0.057 CP+0.0029 CF

رابطه ۴) OMD(%)=14.88+0.889 GP+0.45 CP+0.0651 XA

رابطه ۵) SCFA(mmol/200mgDM)=0.0222 GP-0.00425

که در آن CP، ADF، GP، CF و XA به ترتیب مقادیر پروتئین خام (درصد از ماده خشک)، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (درصد از ماده خشک)، حجم گاز تولیدی در ۲۴ ساعت (میلی لیتر به ازای ۲۰۰ میلی گرم ماده خشک نمونه)، فیبر خام (درصد از ماده خشک) و خاکستر (درصد از ماده خشک) می باشد.

تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک (DMD) و الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDFD) به روش In situ و با استفاده از سه راس قوچ نژاد قزل فیستولادار با در نظر گرفتن نکات بیان شده توسط ونزالت و همکاران (۱۹۹۸) بررسی شد (Vanzant *et al*., 1998). نمونه‌ها پس از آسیاب و الک شدن با توری یک میلی متری برای حذف ذرات ریز، به میزان ۲/۵ گرم در کیسه‌های پلی‌استری با قطر منافذ ۵۰ میکرون قرار داده شد. به‌طوری که نسبت سطح به وزن نمونه ۱۲/۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع باشد (Diao *et al*., 2020). کیسه‌ها برای انکوباسیون به مدت ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت از طریق کانولا در شکمبه قرار داده شدند و سه کیسه شاهد بدون نمونه نیز به‌عنوان کنترل استفاده شد. برای کاهش واریانس، هر زمان انکوباسیون در دو سری متوالی و با استفاده از سه حیوان (۶ تکرار) انجام شد (Mehrez & Ørskov, 1977). پس از خارج کردن، کیسه‌ها ابتدا در آب سرد و سپس مطابق روش کوبلنز و والگنبک تا زمان صاف شدن آب خروجی شسته شده (Coblentz & Walgenbach, 2010) و به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. در نهایت، میزان DMD و NDFD برای هر نمونه محاسبه و ثبت شد.

فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی با استفاده از نرم افزار Fitcurve و رابطه غیر خطی ارسکوف و مکدونالد (۱۹۷۹) به صورت $P=a+b(1-e^{-ct})$ تعیین شد (Ørskov & McDonald, 1979). همچنین با توجه به اینکه دام‌ها در سطح نگهداری تغذیه شده بودند، میزان تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی در سرعت عبور از شکمبه ۲ درصد در ساعت با استفاده از معادله $ED=a+\left(\frac{bc}{c+k}\right)$ مطابق روش ارسکوف و مکدونالد (۱۹۷۴) محاسبه شد. در این معادلات P: میزان تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک یا الیاف نامحلول در شوینده خنثی در زمان t به ازای هر گرم ماده

خشک، a: بخش محلول، b: بخش بالقوه قابل‌تجزیه، c: نرخ تجزیه (h^{-1})، ED تجزیه‌پذیری موثر در نرخ عبور (k=0.02) و e عدد نپر است (Ørskov & McDonald, 1979). نسبت b/(a+b) به معنی سهم بخش بالقوه تجزیه‌پذیر از (a+b) یا کل پتانسیل قابل تجزیه (Jonker *et al*., 2011) و شاخص (t) نیز به معنی زمان لازم برای تجزیه ۵۰ درصد از بخش بالقوه تجزیه‌پذیر می‌باشد (Mikkonen *et al*., 2023).

کلیه فرآوری‌ها در سه تکرار آزمایشی (Experimental Replication) انجام شد و نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از مخلوط این سه تکرار انتخاب شد. برای انجام تجزیه آماری، میانگین حسابی تکرارهای مربوط به آزمون‌های تعیین ترکیبات شیمیایی، تولید گاز و تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای محاسبه و به عنوان داده نهایی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی اثر روش‌های مختلف فرآوری بر ترکیبات شیمیایی، ضرایب همبستگی و فراسنجه های تخمینی از طرح کاملا تصادفی با مدل $Y_i= \mu+T_i+e_i$ و رویه مدل خطی تعمیم یافته نرم افزار SAS 9.4 استفاده شدّ و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال آماری ۰/۹۵ انجام شد. در مورد داده های آزمون تولیدگاز و تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی از مدل $Y_{ij}= \mu+T_i+It_j+Tit_{ij}+e_{ij}$ استفاده شد. در این مدل ها Y_{ij} مشاهده، μ میانگین کل مشاهدات، T_i اثر تیمار، It_j اثر زمان انکوباسیون، Tit_{ij} اثر متقابل زمان انکوباسیون و نوع فرآوری و e_{ij} اثر اشتباه آزمایشی بود. آنالیز آماری با استفاده از رویه‌های PROC MIXED/PLM نرم افزار SAS 9.4 انجام و از ساختار کوواریانس نوع اول استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با گزینه PDIFF در سطح احتمال آماری ۰/۹۵ انجام شد. داده‌های حاصل به صورت میانگین حداقل مربعات و خطای استاندارد در جداول نتایج گزارش شد.

یافته‌های پژوهش

ترکیب شیمیایی نمونه‌ها

نتایج جدول ۲ نشان داد که فرآوری کاه گندم با کشت مایع آسپرژیلوس اورایزا توأم با پرتوتابی الکترونی در دزهای مختلف و دو ترتیب اعمال تیماری، موجب تغییرات معنی‌دار در ترکیب شیمیایی گردید (P<۰/۰۵). با افزایش دز پرتودهی، بازده ماده خشک، ماده آلی، الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی و نیز الیاف گوارش‌ناپذیر نامحلول در شوینده خنثی نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. شدت این کاهش در تیمارهای با پرتوتابی پیش از تخمیر قارچی بیشتر از پرتوتابی پس از تخمیر بود. کمترین مقادیر این شاخص‌ها در تیمار 400A.or مشاهده شد. فرآوری توأم کاه گندم با پرتوهای الکترونی و آنزیم‌های قارچی A.O تأثیر محسوسی بر مقدار مطلق خاکستر نداشت؛ با این حال، بهبود تجزیه‌پذیری ماده خشک و کاهش اجزای الیافی شامل NDF و ADF، موجب افزایش نسبی درصد خاکستر و کاهش معنی‌دار ماده آلی نمونه‌ها شد (P<۰/۰۵). در این مطالعه، تیمار 200A.Or، بیشترین مقدار پروتئین خام را نسبت به سایر تیمارها نشان داد.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی و بازده ماده خشک کاه گندم فرآوری شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اوریزا و پرتودهی الکترونی در سطوح مختلف و دو توالی اعمال تیمار

Table 2- Chemical composition and dry matter recovery of wheat straw processed with a liquid culture of *Aspe oryzae* and electron irradiation at various levels and two different application sequences

p-value			SEM	Treatments							l composition
Order	Dose	Treat		r400	r300	r200	A.Or	A.Or	A.Or	trol	
<0.000	<0.000	<0.000	0.132	90.7^{d}	91.9^{c}	92.3^{b}	89.3^{e}	90.6^{d}	90.6^{d}	95.0^{a}	DM r
<0.000	<0.000	<0.000	0.165	90.3^{c}	91.0^{b}	91.2^{b}	89.5^{d}	90.2^{c}	90.2^{c}	92.8^{a}	
<0.000	<0.000	<0.000	0.005	3.30^{c}	3.27^{d}	3.26^{d}	3.33^{b}	3.30^{c}	3.53^{a}	3.20^{e}	
<0.000	<0.000	<0.000	0.097	63.1^{d}	66.9^{b}	67.5^{b}	57.0^{f}	60.5^{e}	65.0^{c}	72.6^{a}	
<0.000	<0.000	<0.000	0.073	44.1^{c}	45.0^{b}	45.4^{b}	43.5^{d}	43.9^{cd}	44.3^{c}	47.5^{a}	
<0.000	<0.000	<0.000	0.041	32.9^{e}	34.3^{c}	34.5^{b}	30.9^{g}	31.8^{f}	33.3^{d}	36.3^{a}	

1. Potential degradability (PD)
2. Generalized Linear Model (GLM)
3. Standard Error of Means

حروف بالانویس متفاوت در هر سطر، نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵).

Control: کاه گندم فرآوری نشده، 200A.or: پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 300A.or: پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 400A.or: پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، A.Or200: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری، A.Or300: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری، A.Or400: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری، SEM : خطای استاندارد میانگین، *بجز بازده ماده خشک (نسبت ماده خشک باقی‌مانده پس از فرآوری به ماده خشک اولیه ضربدر ۱۰۰)، واحد بقیه اجزای جدول با درصد ماده خشک بیان شده است.

کینتیک و فراسنجه‌های تولید گاز تجمعی

نتایج کینتیک و فراسنجه‌های تولید گاز تجمعی کاه گندم فرآوری‌شده با کشت مایع آسپرژیلوس اورایزا توأم با پرتوتابی الکترونی در جدول ۳ گزارش شده است. برخی تیمارها مانند 200A.Or و A.Or200، کاهش تولید گاز را در ساعات اولیه انکوباسیون (تا ۱۲ ساعت) نشان دادند. با افزایش زمان انکوباسیون از ۱۶ تا ۱۲۰ ساعت، تولید گاز تجمعی کاه گندم فرآوری‌شده که بیانگر مقادیر ترکیبات تجزیه‌پذیر می‌باشد، در تمامی تیمارهای آزمایشی به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود (P<۰/۰۵). بیشترین تولید گاز تجمعی در اغلب زمان‌های انکوباسیون مربوط به تیمارهای 300A.Or و 400A.Or بوده، در حالی‌که کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد. در مقایسه دو ترتیب فرآوری، تیمارهای دریافت‌کننده پرتوتابی الکترونی پیشین، گاز تجمعی بیشتری نسبت به تیمارهای با ترتیب معکوس تولید کردند. همچنین با افزایش زمان انکوباسیون، تولید گاز تجمعی در تمامی تیمارها به طور تدریجی افزایش یافت.

جدول ۳. کینتیک و فراسنجه های تولید گاز کاه گندم فرآوری شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا توام با پرتوهای الکترونی در سه دز و دو ترتیب متفاوت (میلی لیتر به ازای هر گرم ماده خشک)

Table 3. Kinetics and gas production parameters of wheat straw processed with *Aspergillus oryzae* liquid culture and electron irradiation at three doses and two different application sequences (mL/g DM).

p-value			SEM	Treatments							Incubation times
Order	Dose	Treat		A.Or400	A.Or300	A.Or200	400A.Or	300A.Or	200A.Or	control	
0.3972	<0.0001	<0.0001	0.16	9.3^{b}	2.8^{d}	6.2^{c}	7.1^{bc}	12.5^{a}	0.4^{d}	2.0^{d}	2
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	18.2^{c}	10.8^{d}	10.3^{de}	27.7^{a}	24.0^{b}	4.8^{f}	8.0^{e}	4
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	29.3^{c}	19.6^{d}	12.6^{f}	53.1^{a}	39.5^{b}	13.6^{f}	16.5^{e}	6
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	42.2^{c}	31.9^{d}	16.8^{f}	77.0^{a}	56.0^{b}	26.0^{e}	26.0^{e}	8
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	65.3^{c}	52.5^{d}	36.7^{g}	110.8^{a}	86.0^{b}	49.8^{e}	41.4^{f}	12
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	92.8^{c}	75.2^{d}	62.3^{e}	141.1^{a}	115.0^{b}	74.7^{d}	60.4^{e}	16
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	140.3^{c}	112.3^{e}	119.0^{d}	194.9^{a}	166.8^{b}	118.2^{d}	95.3^{f}	24
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	209.5^{c}	171.2^{f}	174.8^{e}	268.5^{a}	243.6^{b}	192.0^{d}	141.4^{g}	36
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	245.8^{c}	212.0^{e}	212.7^{e}	305.2^{a}	282.3^{b}	232.5^{d}	165.9^{f}	48
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	285.0^{c}	251.9^{d}	253.3^{d}	339.6^{a}	314.2^{b}	284.1^{c}	192.0^{e}	60
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	316.5^{c}	278.6^{e}	279.4^{e}	360.0^{a}	333.3^{b}	306.8^{d}	210.9^{f}	72
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	337.9^{c}	298.5^{e}	297.8^{e}	380.0^{a}	345.6^{b}	325.2^{d}	220.0^{f}	84
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	342.1^{c}	307.3^{e}	304.2^{f}	385.1^{a}	349.2^{b}	339.0^{d}	225.8^{g}	96
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.16	351.6^{c}	318.2^{d}	307.4^{e}	391.4^{a}	355.3^{b}	353.9^{bc}	231.1^{f}	120
											Gas parameters
<0.0001	0.0001	<0.0001	1.35	419.59^{b}	404.83^{c}	400.30^{d}	419.48^{b}	392.96^{e}	463.89^{a}	274.53^{f}	**A**
<0.0001	0.0002	<0.0001	0.001	0.0179^{d}	0.0149^{e}	0.0148^{e}	0.0266^{a}	0.0243^{b}	0.0138^{f}	0.0183^{c}	**C**

حروف بالانویس متفاوت در هر سطر، نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵).

Control: کاه گندم فرآوری نشده، 200A.or: پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 300A.or: پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 400A.or: پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، A.Or200: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری، A.Or300: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری، A.Or400: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری، SEM : خطای استاندارد میانگین، A: بخش قابل تخمیر (میلی لیتر به ازای هر گرم ماده خشک) ، C: ثابت نرخ تولید گاز بخش A (h^{-1})

فرآوری توأم کاه گندم با کشت مایع قارچ اورایزا و پرتوتابی الکترونی، موجب افزایش معنی‌دار بخش بالقوه قابل تخمیر در مقایسه با تیمار شاهد شد (P<۰/۰۵). به‌جز تیمارهای پرتوتابی‌شده با دز ۴۰۰ کیلوگری که از نظر مقادیر بخش بالقوه قابل تخمیر اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، سایر تیمارهای فرآوری‌شده تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر و تیمار شاهد نشان دادند (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار بخش بالقوه قابل‌تخمیر در تیمار 200A.Or مشاهده شد که حدود ۶۹ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. این تیمار، کمترین مقدار فراسنجه نرخ تولید گاز را نیز داشت. در حالی‌که بیشترین مقادیر این فراسنجه در تیمارهای پرتودهی‌شده با دزهای بیشتر یعنی 300A.Or و 400A.Or مشاهده شد. به طور کلی، افزایش شدت پرتوتابی در هر دو ترتیب فرآوری موجب افزایش نرخ تولید گاز و بهبود فراسنجه‌های کینتیکی نسبت به تیمار شاهد شد.

فراسنجه‌های تخمینی

فراسنجه‌های تخمینی کاه گندم فرآوری‌شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا همراه با پرتوتابی الکترونی در دزها و ترتیب‌های مختلف در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج نشان داد که تمامی تیمارهای آزمایشی در مقایسه با تیمار شاهد، موجب افزایش معنی‌دار انرژی قابل متابولیسم، گوارش‌پذیری ماده آلی، محتوای اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر، مجموع مواد مغذی قابل هضم و انرژی خالص شیردهی شدند (P<۰/۰۵). به استثنای تیمارهای پرتوتابی شده با دز ۲۰۰ گیلوگری که از نظر فراسنجه‌های انرژی قابل متابولیسم، درصد گوارش‌پذیری ماده آلی و محتوای اسیدهای چرب کوتاه زنجیر با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند، سایر تیمارهای با پرتوتابی پیشین در دزهای مشابه، نسبت به پرتوتابی پسین مقادیر بیشتری از این شاخص‌ها را نشان دادند (P<۰/۰۵).

بیشترین مقادیر انرژی قابل متابولیسم، گوارش‌پذیری ماده آلی و محتوای اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر، مجموع مواد مغذی قابل هضم و انرژی خالص شیردهی در تیمار 400A.Or مشاهده شد. به طور کلی، دز پرتوتابی و ترتیب اعمال آن تاثیر معنی‌داری بر فراسنجه های تخمینی انرژی و گوارش‌پذیری کاه گندم فرآوری‌شده داشت.

جدول ٤. فراسنجه‌های تخمینی کاه گندم فرآوری شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا توام با پرتوهای الکترونی در سه دز و دو ترتیب متفاوت.

Table 4- Estimated parameters of wheat straw processed with *Aspergillus oryzae* liquid culture and electron irradiation at three doses and two different application sequences.

p-value			SEM	Treatments							Estimated parameters
Order	Dose	Treat		A.Or400	A.Or300	A.Or200	400A.Or	300A.Or	200A.Or	control	
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.021	6.31^{c}	5.56^{e}	5.74^{d}	7.79^{a}	7.03^{b}	5.73^{d}	5.10^{f}	ME (MJ/kg DM)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.137	41.93^{c}	36.91^{e}	38.07^{d}	51.72^{a}	46.67^{b}	38.12^{d}	33.73^{f}	OMD (%)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.004	0.62^{c}	0.49^{e}	0.52^{d}	0.86^{a}	0.74^{b}	0.52^{d}	0.42^{f}	SCFA(mmol/200mg DM)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.075	48.60^{c}	47.90^{d}	47.60^{e}	49.14^{a}	48.78^{b}	48.56^{c}	45.98^{f}	TDN (%)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.007	4.48^{c}	4.41^{d}	4.38^{e}	4.53^{a}	4.49^{b}	4.47^{c}	4.21^{f}	NEL(Mj/Kg DM)

حروف بالانویس متفاوت در هر سطر، نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵).

Control: کاه گندم فرآوری نشده، 200A.or: پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 300A.or: پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 400A.or: پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، A.Or200: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری، A.Or300: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری، A.Or400: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری، SEM : خطای استاندارد میانگین، ME: انرژی قابل متابولیسم (مگاژول در کیلوگرم ماده خشک)، OMD: ماده آلی گوارش پذیر(درصد ماده خشک)، SCFA: اسیدهای چرب کوتاه زنجیر(میلی مول در ۲۰۰ میلی گرم ماده خشک)، TDN: کل مواد مغذی قابل هضم (درصد)، NEL: انرژی خالص شیردهی(مگاژول درکیلوگرم ماده خشک)

کینتیک و فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک:

نتایج جدول ۵ نشان داد که تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک کاه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دز پرتوتابی و ترتیب فرآوری قرار گرفت (P<۰/۰۵). در ساعات اولیه انکوباسیون (۲–۱۲ ساعت)، تیمارهای پرتوتابی پیشین، به‌ویژه در دزهای ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری، مقادیر بیشتری از تجزیه‌پذیری ماده خشک را نسبت به شاهد و تیمارهای پرتوتابی پسین نشان دادند. این روند با

افزایش زمان انکوباسیون تقویت شد؛ به‌طوری‌که تیمارهای 300A.Or و 400A.Or در تمامی زمان‌ها، تجزیه‌پذیری بیشتری نسبت به شاهد و تیمارهای متناظر پرتوتابی پسین داشتند. در ۹۶ ساعت انکوباسیون، بیشترین تجزیه‌پذیری ماده خشک (۶۸/۵۰) به تیمار 400A.Or اختصاص یافت که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد (۵۱/۲۳) بود. اگرچه تیمارهای پرتوتابی پسین نیز نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در تجزیه پذیری ماده خشک نشان دادند (P<۰/۰۵)، اما در اغلب زمان‌های انکوباسیون، مقادیر آن‌ها کمتر از تیمارهای پرتوتابی پیشین با دز مشابه بود. به‌طور کلی، نتایج بیانگر اثر مثبت افزایش دز پرتوتابی و نقش تعیین‌کننده ترتیب پرتوتابی و تخمیر قارچی بر بهبود کینتیک تجزیه‌پذیری ماده خشک کاه گندم بود.

بررسی فراسنجه‌های کینتیکی نشان داد که بخش سریع‌تجزیه در تیمارهای 300A.Or و 400A.Or به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (P<۰/۰۵) و در سایر تیمارها به‌جز تیمار A.Or200، اگرچه روند افزایشی در این بخش مشاهده شد، اما این افزایش به سطح معنی‌داری نرسید. بخش بخش بالقوه قابل تجزیهدر تمامی تیمارهای فرآوری توام، به‌ویژه تیمارهای پرتوتابی پیشین، نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری داشت (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار این بخش در تیمار 200A.Or مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد افزایشی معادل ۶۵/۲۸ درصد نشان داد. سرعت تجزیه‌پذیری ماده خشک کاه گندم در اغلب تیمارهای فرآوری توام، به‌جز تیمار A.Or300، تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد داشت (P<۰/۰۵). تیمارهای پرتوتابی پیشین با دزهای ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری و تیمار پرتوتابی پسین با دز ۴۰۰ کیلوگری، سرعت تجزیه بیشتری نسبت به شاهد نشان دادند؛ در حالی‌که تیمارهای با دز ۲۰۰ کیلوگری در هر دو ترتیب فرآوری، مقادیر کمتری از نرخ تجزیه را نسبت به تیمار شاهد نشان دادند.

جدول ۵. کینتیک و فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری ماده خشک کاه گندم فرآوری شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا توام با پرتوهای الکترونی در سه دز و دو ترتیب متفاوت (درصد از ماده خشک)

Table 5- Kinetics and dry matter degradability parameters of wheat straw processed with *Aspergillus oryzae* liquid culture and electron irradiation at three doses and two different application sequences (% DM).

p-value			SEM	Treatments							Incubation times
Order	Dose	Treat		A.Or400	A.Or300	A.Or200	400A.Or	300A.Or	200A.Or	control	
<0.002	<0.0004	<0.0001	0.239	5.86^{bc}	4.28^{c}	3.93^{c}	9.05^{a}	7.03^{ab}	4.33^{c}	4.18^{c}	2
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	9.35^{b}	6.95^{c}	6.45^{c}	14.30^{a}	11.25^{b}	7.05^{c}	6.78^{c}	4
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	12.68^{c}	9.50^{d}	8.80^{d}	19.03^{a}	15.18^{b}	9.70^{d}	9.23^{d}	6
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	15.73^{c}	11.98^{d}	11.10^{d}	23.38^{a}	18.83^{b}	12.20^{d}	11.58^{d}	8
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	21.38^{c}	16.53^{d}	15.33^{d}	30.97^{a}	25.30^{b}	16.98^{d}	15.90^{d}	12
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	34.78^{c}	27.83^{ed}	26.05^{e}	47.07^{a}	39.63^{b}	29.03^{d}	26.53^{e}	24
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	50.48^{c}	42.73^{e}	40.53^{ed}	61.83^{a}	54.23^{b}	45.78^{d}	40.10^{f}	48
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	58.03^{bc}	51.10^{d}	49.00^{de}	66.83^{a}	59.98^{b}	55.95^{c}	47.40^{e}	72
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.239	61.53^{b}	55.70^{c}	53.83^{c}	68.50^{a}	62.20^{b}	61.95^{b}	51.23^{d}	96
											Parameters
0.0123	0.0034	0.0023	0.333	2.12^{bc}	1.44^{c}	1.33^{c}	3.34^{a}	2.42^{ab}	1.44^{c}	1.40^{c}	a
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.535	62.83^{c}	60.33^{de}	59.43^{e}	66.06^{b}	61.27^{cd}	69.96^{a}	54.38^{f}	b
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.454	64.95^{c}	61.76^{d}	60.75^{d}	69.40^{b}	63.69^{c}	71.40^{a}	55.78^{e}	PD=(a+b)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	0.0306^{c}	0.0240^{de}	0.0224^{ef}	0.0453^{a}	0.0389^{b}	0.0209^{f}	0.0258^{d}	c
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.122	40.09^{c}	34.34^{e}	32.74^{f}	49.13^{a}	42.89^{b}	37.20^{d}	32.06^{g}	ED(k=0.02)
0.0420	0.0063	0.0098	0.005	0.967^{ab}	0.980^{a}	0.980^{a}	0.952^{c}	0.962^{bc}	0.980^{a}	0.975^{ab}	b/(a+b)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.477	22.7^{e}	28.9^{c}	30.9^{b}	15.3^{g}	17.8^{f}	33.2^{a}	26.8^{d}	½ED(t)

حروف بالانویس متفاوت در هر سطر، نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵).

Control: کاه گندم فرآوری نشده، 200A.or: پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 300A.or: پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 400A.or: پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، A.Or200: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری، A.Or300: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری، A.Or400: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری، SEM: خطای استاندارد میانگین، a: بخش سریع تجزیه (٪)، b: بخش بخش بالقوه قابل تجزیه(٪)، c: ثابت نرخ تجزیه بخش b (h^{-1})، ED تجزیه پذیری موثر در نرخ عبور (k=0.02)، b/(a+b) سهم بخش بالقوه تجزیه پذیر از پتانسیل قابل تجزیه (PD)، زمان لازم برای تجزیه ۵۰ درصد از بخش b (h)

با توجه به ماهیت فیبری کاه گندم، تجزیه‌پذیری مؤثر[1] ماده خشک بر اساس نرخ عبور ۲٪ محاسبه شد (Ørskov & McDonald, 1979). تمامی تیمارهای فرآوری شده نسبت به شاهد، افزایش معنی‌داری در تجزیه‌پذیری موثر ماده خشک نشان دادند (P<۰/۰۵). بیشترین تجزیه‌پذیری مؤثر در تیمارهایی مشاهده می‌شود که دارای بخش سریع‌تجزیه، بخش بخش بالقوه قابل تجزیهو نرخ تجزیه بیشتری بودند. بر این اساس، تیمار 400A.Or بیشترین تجزیه‌پذیری مؤثر را در میان تیمارها نشان داد. این تیمار در مقایسه با شاهد، فراسنجه **b/(a+b) کمتری نشان داد** (P<۰/۰۵). **همچنین فراسنجه** در تیمارهای فرآوری توام به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد تغییر یافتند. زمان لازم برای تجزیه ۵۰ درصد از بخش بالقوه قابل تجزیه در تیمارهای پرتوتابی پیشین با دزهای ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری به‌ترتیب ۱۷/۸ و ۱۵/۳ ساعت بود، در حالی‌که بیشترین مقدار این شاخص در تیمارهای پرتوتابی با دز ۲۰۰ کیلوگری مشاهده شد.

کینتیک و فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای الیاف نامحلول در شوینده خنثی

فراسنجه‌های کینتیکی و تجزیه‌پذیری NDF کاه گندم تحت فرآوری توام با پرتو الکترونی و آنزیم‌های آسپرژیلوس اورایزا در دو ترتیب در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در همه تیمارهای آزمایشی، تجزیه‌پذیری NDF با افزایش زمان انکوباسیون شکمبه‌ای روند افزایشی نشان داد و به‌جز تیمارهای پرتودهی شده با دز ۲۰۰ کیلوگری تا زمان ۲۴ ساعت، سایر تیمارهای فرآوری شده در تمامی زمان‌های انکوباسیون اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نشان دادند (P<۰/۰۵). بیشترین مقادیر تجزیه‌پذیری NDF در تیمارهای با دز ۴۰۰ کیلوگری پرتوتابی پیشین و پسین مشاهده شد. تحلیل داده‌ها نشان داد که بخش سریع‌تجزیه در نمونه‌های پرتوتابی شده با دز ۲۰۰ کیلوگری به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت، در حالی که در دزهای بیشتر (۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری)، کاهش معنی‌داری در این بخش مشاهده شد، که نشان‌دهنده یک پاسخ پیچیده وابسته به دز است.

جدول ٦. کینتیک و فراسنجه‌های تجزیه پذیری الیاف نامحلول در شوینده خنثی کاه گندم فرآوری شده با کشت مایع قارچ آسپرژیلوس اورایزا توام با پرتوهای الکترونی در سه دز و دو ترتیب متفاوت (درصد از ماده خشک)

Table 5- Kinetics and NDF degradability parameters of wheat straw processed with *Aspergillus oryzae* liquid culture and electron irradiation at three doses and two different application sequences (% DM).

p-value			SEM	Treatments							Incubation times
Order	Dose	Treat		A.Or400	A.Or300	A.Or200	400A.Or	300A.Or	200A.Or	control	
0.0257	<0.0001	<0.0001	0.189	7.43^{ab}	6.23^{b}	4.53^{c}	7.77^{a}	6.53^{ab}	6.33^{b}	4.13^{c}	2
0.0322	<0.0001	<0.0001	0.189	10.50^{a}	8.30^{bc}	5.83^{e}	11.12^{a}	8.63^{b}	7.23^{cd}	6.70^{de}	4
0.0057	<0.0001	<0.0001	0.189	14.35^{a}	11.50^{b}	6.93^{d}	15.50^{a}	11.83^{b}	8.50^{c}	8.10^{cd}	6
0.0305	<0.0001	<0.0001	0.189	21.80^{b}	18.38^{c}	11.43^{d}	23.20^{a}	19.30^{c}	11.48^{d}	11.00^{d}	8
0.0001	<0.0001	<0.0001	0.189	28.63^{b}	24.28^{d}	17.95^{e}	30.48^{a}	26.40^{c}	18.20^{e}	17.20^{e}	12
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.189	35.28^{b}	30.40^{d}	23.68^{f}	37.43^{a}	33.18^{c}	25.53^{e}	23.40^{f}	24
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.189	39.83^{b}	34.18^{d}	32.18^{e}	42.13^{a}	38.28^{c}	34.30^{d}	30.38^{f}	48
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.189	42.58^{b}	38.23^{c}	36.20^{d}	45.18^{a}	41.83^{b}	37.10^{cd}	32.58^{e}	72
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.189	45.20^{b}	40.68^{c}	39.45	48.56^{a}	45.10^{b}	40.30^{c}	34.13^{d}	96
											Parameters
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.008	0.32^{e}	0.40^{d}	1.09^{b}	0.27^{f}	0.09^{g}	2.21^{a}	0.67^{c}	a
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.007	42.62^{b}	37.96^{f}	38.22^{e}	45.42^{a}	42.49^{c}	38.25^{d}	33.19^{g}	b
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.004	42.93^{b}	38.36^{f}	39.31^{e}	45.69^{a}	42.58^{c}	40.46^{d}	33.86^{g}	PD=(a+b)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	0.0790^{a}	0.0703^{b}	0.0383^{e}	0.0791^{a}	0.0674^{c}	0.0386^{e}	0.0494^{d}	c
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.004	34.32^{b}	29.95^{d}	26.19^{f}	36.52^{a}	32.87^{c}	27.40^{e}	24.30^{g}	ED(k=0.02)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.001	0.990^{b}	0.990^{b}	0.970^{d}	0.990^{b}	1.000^{a}	0.950^{e}	0.980^{c}	b/(a+b)
<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.008	8.8^{f}	9.9^{e}	18.1^{a}	8.8^{f}	10.3^{d}	18.0^{b}	14.0^{c}	½ED(t)

حروف بالانویس متفاوت در هر سطر، نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵).

Control: کاه گندم فرآوری نشده، 200A.or: پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 300A.or: پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، 400A.or: پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری + عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا، A.Or200: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۲۰۰ کیلوگری، A.Or300: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۳۰۰ کیلوگری، A.Or400: عصاره آنزیمی قارچ آسپرژیلوس اورایزا + پرتوتابی الکترونی ۴۰۰ کیلوگری، SEM: خطای استاندارد میانگین، a: بخش سریع تجزیه (٪)، b: بخش بالقوه قابل تجزیه(٪)، c: ثابت نرخ تجزیه بخش b (h^{-1})، ED تجزیه پذیری موثر در نرخ عبور (k=0.02)، b/(a+b) سهم بخش بالقوه تجزیه پذیر از پتانسیل قابل تجزیه (PD)، زمان لازم برای تجزیه ۵۰ درصد از بخش b (h)

1. Effective degradability (ED)

تمام تیمارهای آزمایشی افزایش معنی‌داری در بخش بخش بالقوه قابل تجزیه نسبت به شاهد نشان دادند، به‌ویژه در دزهای ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگری، که ترتیب پرتوتابی پیشین، مقادیر بیشتری را نسبت به ترتیب معکوس ایجاد کرد. به عنوان مثال، مقادیر بخش بخش بالقوه قابل تجزیهNDF برای تیمارهای 300A.Or و 400A.Or به ترتیب ۴۲/۴۹ و ۴۵/۴۲ درصد بود که در مقایسه با تیمار شاهد (۲۳/۱۹ درصد) به ترتیب به مقدار ۲۸/۰۲ و ۳۶/۸۴ درصد افزایش نشان داد.

فراسنجه حداکثر پتانسیل تجزیه‌پذیری NDF در تمامی تیمارها به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاهد بود، به‌طوری که تیمار 400A.Or، بیشترین مقدار (۴۵/۶۹ درصد) را نشان داد. نرخ تجزیه بخش بالقوه قابل تجزیه NDF در نمونه‌های پرتوتابی شده با دز ۴۰۰ کیلوگری بیشترین و در تیمارهای با دز ۲۰۰ کیلوگری، کمترین مقادیر را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. تجزیه‌پذیری مؤثر NDF در نرخ عبور ۲٪ در تیمار شاهد کمترین مقدار بود، در حالی‌که تیمار400A.Or با افزایشی نزدیک به ۵۰ درصد نسبت به شاهد، بیشترین مقدار را در میان تیمارهای فرآوری توأم داشت. فراسنجه**b/(a+b)** در تیمار 300A.Or برابر با ۱ بود که نشان‌دهنده فقدان بخش سریع تجزیه NDF و تمرکز پتانسیل تجزیه‌پذیری در بخش بالقوه قابل تجزیه است، در مقابل، تیمار 200A.Or با مقدار ۰/۹۵ کمترین مقدار را در مقایسه با شاهد و تیمارهای فرآوری شده داشت. همچنین، تجزیه ۵۰ درصد از بخش کندتجزیه در دز ۲۰۰ کیلوگری بیشترین و در دز ۴۰۰ کیلوگری کمترین زمان لازم را نشان داد که اختلاف آن‌ها با تیمار شاهد معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$).

ضرایب همبستگی و معادلات خط رگرسیونی

نتایج جدول ۷ نشان داد که در تمامی تیمارها، بین تولید گاز برون‌تنی و قابلیت هضم ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی همبستگی قوی و مثبت وجود دارد.

جدول ۷. ضرایب همبستگی بین گاز تولیدی و تجزیه پذیری شکمبه ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی، معادلات خط رگرسیونی و ضرایب تعیین آن

Table 7- Correlation coefficients between gas production and ruminal degradability of DM and NDF, linear regression equations, and coefficients of determination.

R²(NDFD)	R²(DMD)	Regression (GP-NDFD)	Regression (GP-DMD)	r(GP–NDFD)	r(GP–DMD)	Treatments
0.83	0.92	NDFD=0.165GP-2.30	DMD=0.259GP+1.84	0.91	0.95	control
0.97	0.98	NDFD=0.09GP+0.6	DMD=0.163GP+7.18	0.98	0.99	200A.Or
0.93	0.98	NDFD=0.094GP-1.64	DMD=0.157GP+8.98	0.96	0.99	300A.Or
0.94	0.97	NDFD=0.094GP-0.95	DMD=0.151GP+13.83	0.97	0.98	400A.Or
0.96	0.98	NDFD=0.097GP+0.55	DMD=0.155GP+6.62	0.98	0.99	A.Or200
0.97	0.99	NDFD=0.1GP-0.038	DMD=0.164GP+6.37	0.98	0.99	A.Or300
0.96	0.98	NDFD=0.1GP-0.74	DMD=0.162GP+8.14	0.98	0.99	A.Or400

بحث

ترکیب شیمیایی نمونه‌ها

کاهش مقادیر ماده خشک، ماده آلی و اجزای الیافی در اثر پرتوتابی الکترونی را می‌توان به ایجاد شکست در زنجیره‌های لیگنوسلولزی و افزایش تخلخل سطحی در مقیاس میکرو و ماکروسکوپی نسبت داد؛ فرآیندی که موجب افزایش دسترسی آنزیم‌ها و حلال‌ها به ماتریکس دیواره سلولی می‌شود (Bak *et al*., 2009; Henniges *et al*., 2013). پرتوتابی الکترونی با شکستن پیوندهای کربن–کربن و کربن–اکسیژن و تشکیل رادیکال‌های آزاد، موجب تولید ترکیبات فرار شده که خروج آنها از نمونه، کاهش بازده ماده خشک و ماده آلی را به دنبال دارد (Henniges *et al*., 2013). در این میان، آسکومایست‌هایی نظیر آسپرژیلوس اورایزا، با ترشح آنزیم‌های لیگنولیتیک و هیدرولیتیک (لیگنین پراکسیداز، منگنز پراکسیداز، لاکاز، سلولاز و همی‌سلولاز)، نقش موثری در تخریب لیگنین و هیدرولیز پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی ایفا می‌کند (Andlar *et al*., 2018). تبدیل اجزای دیواره گیاهی به ترکیبات محلول در کشت‌های مایع، کاهش ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی

را به دنبال دارد (Kong *et al*., 2021; van Kuijk *et al*., 2017). با این حال، شدت این تغییرات به گونه قارچ و شرایط آزمایشی وابسته بوده و می‌تواند بهبود قابلیت هضم مواد مغذی را به همراه داشته باشد (Thakur *et al*., 2013).

بهبود تجزیه‌پذیری ماده خشک و کاهش اجزای الیافی شامل NDF و ADF، موجب افزایش نسبی درصد خاکستر و کاهش معنی‌دار ماده آلی نمونه‌ها شد. موضوعی که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Henniges *et al*., 2013; Shahbazi *et al*., 2008). کاهش الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی، نشان‌دهنده فعالیت موثر کمپلکس‌های آنزیمی لیگنوسلولازی قارچ اورایزا بوده (Hu *et al*., 2011) که در حضور پرتوتابی الکترونی، اثر هم‌افزایی قابل‌توجهی بر افزایش بخش قابل هضم الیاف و بهبود قابلیت تخمیر آنها دارد (Oba & Allen, 1999; Zhao *et al*., 2012). افزایش مقدار پروتئین خام در تیمار 200A.Or، نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی دز مناسب پرتوتابی الکترونی همراه با کشت مایع قارچی بر افزایش محتوای نیتروژنی نمونه‌ها است. مطالعه‌های پیشین نشان داده‌اند که دزهای کم تا متوسط پرتوتابی با تسهیل بازشدن ساختارهای فیبری و افزایش دسترسی آنزیمی، موجب بهبود ترکیب شیمیایی می‌شوند؛ در حالی‌که دزهای بیشتر، به‌واسطه تشکیل رادیکال‌های آزاد، می‌توانند باعث تخریب پروتئین، دآمیناسیون و اتلاف نیتروژن پروتئینی و در نهایت، ایجاد تفاوت در تیمارهای فرآوری شده شوند (Chandra *et al*., 2021; Orynbekov *et al*., 2025). افزایش درصد پروتئین خام علی‌رغم کاهش ماده خشک در اثر فرآوری، قابل توجیه بوده و با گزارش‌های پیشین مطابقت دارد (Ghoorchi *et al*., 2016).

کینتیک و فراسنجه‌های تولید گاز تجمعی

کاهش تولید گاز در ساعات اولیه انکوباسیون در برخی تیمارهای فرآوری‌شده را می‌توان به تخریب ساختار لیگنوسلولزی و آزادسازی ترکیبات فنولی نظیر اسیدهای فرولیک و P–کوماریک نسبت داد (Michalet-Doreau & Ould-Bah, 1992). این ترکیبات می‌توانند به‌طور موقت، فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده الیاف و کلونیزاسیون میکروبی را مهار کرده و فاز تأخیری تخمیر را افزایش دهند (Getachew *et al*., 2004; Menke & steingass, 1988). با این‌حال، این کاهش موقت تولید گاز اولیه، بیشتر بیانگر یک دوره سازگاری گذرای میکروبی بوده و الزاماً به معنای کاهش قابلیت تخمیر سوبسترا در مراحل بعدی انکوباسیون نیست (Abid, 2025). افزایش معنی‌دار تولید گاز تجمعی در مراحل میانی و پایانی انکوباسیون نشان‌دهنده افزایش مقدار ترکیبات قابل‌تجزیه در تیمارهای فرآوری شده است. برتری تیمارهای پرتوتابی شده پیش از تخمیر قارچی از نظر تولید گاز تجمعی را می‌توان به تخریب مؤثرتر لیگنین، کاهش نظم ساختاری سلولز، تجزیه همی‌سلولز و افزایش تخلخل سطحی ماده نسبت داد؛ عواملی که دسترسی آنزیم‌های قارچی به دیواره سلولی را تسهیل می‌کنند (Bak *et al*., 2009; Henniges *et al*., 2013). این یافته‌ها با گزارش‌های پیشین مبنی بر بهبود تولید گاز و قابلیت هضم مواد لیگنوسلولزی در اثر فرآوری‌های زیستی و پرتوتابی الکترونی همخوانی دارد (Hajipour & Shawrang, 2024; Souza *et al*., 2021; Sun *et al*., 2014; Wang *et al*., 2023).

افزایش بخش بخش بالقوه قابل تجزیهدر تیمارهای فرآوری‌شده، نشان‌دهنده افزایش سهم ماده آلی قابل‌تخمیر در نتیجه تخریب ساختار دیواره سلولی و افزایش دسترسی میکروبی است. بیشترین مقدار این بخش در تیمار 200A.Or همراه با کمترین نرخ تجزیه، بیانگر الگوی تخمیر تدریجی و پایدار بوده که معمولاً در فرآوری‌های ملایم لیگنوسلولزی گزارش می‌شود (Fei *et al*., 2024). این الگو می‌تواند از نظر تغذیه‌ای مطلوب باشد، زیرا افزایش پتانسیل تجزیه بدون افزایش شدید نرخ هیدرولیز، خطر ناپایداری تخمیر شکمبه‌ای را کاهش می‌دهد. در مقابل، افزایش نرخ تجزیه در تیمارهای دریافت‌کننده دزهای بیشتر پرتوتابی، نشان‌دهنده تسریع تجزیه دیواره سلولی است. پرتوتابی الکترونی با ایجاد شکست در پیوندهای لیگنین–پلی‌ساکارید و کاهش کریستالیته سلولز (Ehlermann, 2016)، دسترسی میکروارگانیسم‌های شکمبه‌ای به کربوهیدرات‌های ساختاری را افزایش می‌دهد (Moradi *et al*., 2015). هم‌زمان فعالیت آنزیم‌های سلولاز و زایلاناز تولیدشده توسط عصاره کشت مایع اورایزا، می‌تواند این اثر را تشدید کند (Kong *et al*., 2021).

اختلاف مشاهده شده بین تولید گاز تجمعی و مقادیر بخش بالقوه قابل‌تجزیه، احتمالاً به ماهیت برآوردی این فراسنجه و نیاز به دوره‌های انکوباسیون طولانی‌تر برای تعیین دقیق آن مربوط است؛ ازاین‌رو تفسیر این بخش باید در چارچوب منحنی کامل تولید گاز انجام شود (Menke *et al*., 1979) و احتمالا در انتهای فرآیند انکوباسیون کامل، به صورت همبستگی مثبت حجم

گاز تجمعی تولید شده و پتانسیل بالقوه تولید گاز مشاهده می‌شد. در مجموع، نتایج نشان داد که افزایش شدت پرتوتابی، به‌ویژه زمانی که پیش از تخمیر قارچی اعمال شود، با آماده‌سازی مؤثرتر سوبسترای لیگنوسلولزی، موجب افزایش کارایی فعالیت‌های آنزیمی قارچ و بهبود فراسنجه‌های کینتیکی تولید گاز شد؛ یافته‌ای که با گزارش‌های پیشین مبنی بر افزایش ۲۰ تا ۴۰ درصدی تولید گاز کاه گندم در اثر پرتوتابی الکترونی همخوانی دارد (Al-Masri & Guenther, 1999; Bak, 2014).

فراسنجه‌های تخمینی

مشاهده بیشترین مقادیر انرژی قابل متابولیسم، گوارش‌پذیری ماده آلی، اسیدهای چرب کوتاه زنجیر، مجموع مواد مغذی قابل هضم و انرژی خالص شیردهی در تیمار 400A.Or نشان داد که دزهای بیشتر پرتوتابی، علی‌رغم کاهش نسبی برخی فراسنجه‌های کینتیکی مانند ظرفیت بالقوه تولید گاز (جدول ۳) ، می‌توانند کارایی مسیرهای گلیکولیتیک میکروبی و تولید اسیدهای چرب فرار را افزایش دهد. همچنین بهبود تخمیر الیاف و فعالیت باکتری‌های فیبرولیتیک، می‌تواند افزایش استات، بوتیرات و مجموع اسیدهای چرب فرار را توجیه کند (Van Soest, 2018). در مقابل، اگرچه تیمار 200A.Or، بیشترین ظرفیت بالقوه تولید گاز را نشان داد، این امر لزوماً با بهبود هضم‌پذیری واقعی یا افزایش تولید اسیدهای چرب فرار همراه نبود، زیرا فراسنجه ظرفیت بالقوه تولید گاز، بیانگر پتانسیل تجزیه بخش نامحلول ولی قابل‌تخمیر سوبسترا است و الزاماً کارایی مسیرهای تخمیری را منعکس نمی‌کند. از آنجا که برآورد شاخص‌های انرژی و گوارش‌پذیری بر پایه تولید گاز تجمعی ۲۴ ساعت نخست انکوباسیون انجام می‌شود، مقادیر کمتر این شاخص‌ها در تیمار 200A.Or نسبت به دزهای بیشتر پرتوتابی قابل توجیه است. این یافته‌ها با گزارش بلومل و اورسکوف (۱۹۹۳) مبنی بر عدم هم‌راستایی کامل بین گاز تجمعی و بازده واقعی تخمیر مطابقت دارد (Blümmel & Ørskov, 1993). افزون بر این، آنزیم‌های قارچی می‌توانند با افزایش نفوذپذیری و دسترسی مؤثر به اجزای ساختاری، فرآیند تخمیر را کارآمدتر سازند؛ در حالی‌که فرآوری توام با تابش پسین، به دلیل محدود شدن دسترسی آنزیمی، افزایش مشابهی در فراسنجه‌های انرژی و گوارش‌پذیری ایجاد نمی‌کند (Lam *et al*., 2000).

کینتیک و فراسنجه‌های تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای

افزایش معنی‌دار تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تیمارهای فرآوری توام را می‌توان به تغییرات ساختاری و شیمیایی در ماتریکس لیگنوسلولزی نسبت داد که موجب افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی و دسترسی میکروارگانیسم‌های شکمبه‌ای به سوبسترا شده است. پرتوتابی الکترونی در دزهای کم با کاهش درجه پلیمریزاسیون (Henniges *et al*., 2012)، موجب تخریب بیشتر سلولز و همی‌سلولز شده (Sarosi *et al*., 2020) و در دزهای بیشتر با کاهش طول زنجیره سلولز، آزادسازی پلی‌ساکاریدهای قابل‌هضم را تسهیل می‌کند (Bak, 2014; Duarte *et al*., 2012). از سویی دیگر، پرتوتابی الکترونی از طریق تغییر ساختار لیگنین، کاهش نظم ساختاری سلولز و افزایش تخلخل و سطح ویژه، کارایی هیدرولیز و دسترسی آنزیمی به ماتریکس لیگنوسلولزی را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Chung *et al*., 2012; Gryczka *et al*., 2014) و می‌تواند ساختار سوبسترا را برای تخریب زیستی آماده‌تر می‌کند (Driscoll *et al*., 2009).

در کنار آن، فرآوری زیستی با آنزیم‌های قارچ آسپرژیلوس اورایزا، با شکستن پیوندهای لیگنین–پلی‌ساکارید، دسترسی میکروارگانیسم‌های شکمبه‌ای به دیواره سلولی را افزایش می‌دهد (Motamedi, 2019). این قارچ از طریق کاهش پتانسیل رداکس (Kholif *et al*., 2024) و افزایش جمعیت باکتری‌های سلولولیتیک در شکمبه (Wiedmeier *et al*., 1987)، موجب افزایش قابلیت هضم ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی و اسیدی شده است (Chen *et al*., 2004; Gomez-Alarcon *et al*., 1990; Kong *et al*., 2021). نشان داده شده است که افزودن همزمان عصاره قارچ آسپرژیلوس اورایزا و آسپرژیلوس نیجر، سبب افزایش قابلیت هضم ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی می‌گردد (Kong *et al*., 2021).

در بررسی تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای ماده خشک، افزایش معنی‌دار بخش سریع‌تجزیه در تیمارهای 300A.Or و 400A.Or، بیانگر تضعیف موثر پیوندهای لیگنین–پلی‌ساکارید در اثر پرتوتابی و افزایش دسترسی آنزیمی به ساختار کاه گندم است. در مقابل، عدم افزایش معنی‌دار این بخش در برخی از تیمارها، از جمله تیمار A.Or200، نشان‌دهنده وابستگی پاسخ به دز پرتوتابی و ترتیب فرآوری بوده و بیان می‌کند که در برخی شرایط، شدت شکست ساختاری برای ایجاد تغییر معنی‌دار، کافی نیست. این نتایج با گزارش‌های پیشین مبنی بر اثر متغیر ترکیب فرآوری‌های فیزیکی و زیستی بر بخش‌های سریع‌تجزیه سوبسترا مطابقت دارد

(Karthika *et al*., 2012). افزایش بخش بخش بالقوه قابل تجزیهدر تیمارهای فرآوری توام نیز نشان‌دهنده افزایش نفوذپذیری میکروبی به دیواره سلولی و تسهیل هیدرولیز کربوهیدرات‌های ساختاری است. برتری تیمار 200A.Or از نظر مقدار بخش بالقوه قابل‌تجزیه، می‌تواند به اثرات پرتوتابی ملایم‌تر در حفظ ظرفیت این بخش نسبت داده شود؛ یافته‌ای که با نتایج کارتیکا و همکاران مطابقت دارد (Karthika *et al*., 2012).

افزایش نرخ تجزیه‌پذیری ماده خشک در تیمارهای با دزهای بیشتر پرتوتابی، بیانگر تسریع هیدرولیز دیواره سلولی و افزایش دسترسی انرژی در ساعات اولیه تا میانی انکوباسیون است. این نتایج با گزارش‌های پیشین در خصوص افزایش سرعت تخمیر شکمبه‌ای یونجه در اثر فرآوری با آسپرژیلوس اورایزا مطابقت دارد (Gomez-Alarcon *et al*., 1990). در مقابل، کاهش نرخ تجزیه در تیمارهای با دز ۲۰۰ کیلوگری می‌تواند به شدت ناکافی تغییرات ساختاری یا آزادسازی ترکیبات مهارکننده در مراحل اولیه تخمیر نسبت داده شود (Saghebi *et al*., 2023; Takalloozadeh *et al*., 2013). برتری تیمار 400A.Or از نظر تجزیه‌پذیری مؤثر ماده خشک ناشی از افزایش هم‌زمان بخش محلول، بخش بخش بالقوه قابل تجزیهو نرخ تجزیه است و با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد (Nayan *et al*., 2019; Shawrang *et al*., 2012). کاهش معنی‌دار زمان لازم برای تجزیه ۵۰ درصد از بخش کندتجزیه در تیمارهای پرتوتابی پیشین با دزهای بیشتر نیز نشان‌دهنده تسریع فرآیند تخمیر و افزایش کارایی هضم شکمبه‌ای است. ارتباط معکوس فراسنجه‌های و نرخ تجزیه تأیید می‌کند که تیمارهایی با سرعت تجزیه بیشتر، زمان کمتری برای تخریب بخش بالقوه قابل تجزیه نیاز دارند.

در بررسی تجزیه‌پذیری شکمبه‌ای الیاف نامحلول در شوینده خنثی، افزایش بخش سریع‌تجزیه در دز ۲۰۰ کیلوگری و بخش بالقوه قابل تجزیه و نرخ تجزیه آن در دزهای متوسط و بیشتر نشان می‌دهد که پرتودهی الکترونی، با شکستن موانع فیزیکوشیمیایی بین لیگنین و کربوهیدرات‌های دیواره سلولی و کاهش کریستالینیته سلولز، نفوذ آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌ها به دیواره سلولی را تسهیل می‌کند (Bak, 2014). کاهش بخش سریع تجزیه در دزهای بیشتر نیز احتمالا ناشی از تغییرات ساختاری گسترده‌تر در اثر پرتودهی شدید است که بیانگر یک پاسخ وابسته به دز می‌باشد (Shahbazi *et al*., 2008). برتری ترتیب پرتوتابی پیشین نسبت به پسین نیز احتمالاً ناشی از آماده‌سازی بهتر بستر لیگنوسلولزی برای عملکرد مؤثرتر آنزیم‌های قارچی است.

بهبود معنی‌دار تجزیه‌پذیری مؤثر NDF در تیمارهای پرتودهی‌شده، به‌ویژه در دز ۴۰۰ کیلوگری، نشان‌دهنده افزایش کارایی واقعی هضم در شرایط دینامیک شکمبه است که با گزارش‌های پیشین درباره اثر دز مناسب تابش بر افزایش تجزیه‌پذیری موثر همخوانی دارد (Shahbazi *et al*., 2008). تفاوت در الگوی پاسخ بین افزایش بخش سریع‌تجزیه در دزهای کم و افزایش فراسنجه‌های بخش بالقوه قابل تجزیه و نرخ تجزیه در دزهای بیشتر پرتودهی، وجود یک آستانه واکنش ساختاری در ماتریکس لیگنوسلولزی را تأیید می‌کند که به نوع سوبسترا و شدت فرآوری وابسته است (Fatehi *et al*., 2020).

شاخص تجزیه‌پذیری الیاف نامحلول در شوینده خنثی، نشان دهنده وجود تفاوت در توزیع نسبی بخش‌های تجزیه‌پذیر و آماده‌سازی ماتریکس لیگنوسلولزی برای تجزیه میکروبی بود؛ الگویی که احتمالا به تغییر در دسترسی سطحی و میزان ترکیبات مهارکننده اولیه طی فرآوری نسبت داده می‌شود (Uwineza *et al*., 2024).

نتایج نشان داد که فرآوری توام کاه گندم با پرتوتابی الکترونی و آنزیم‌های قارچی، می‌تواند قابلیت تخمیر شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی را به‌طور معنی‌داری بهبود دهد؛ یافته‌ای که با گزارش‌های پیشین همخوانی داشته و از نظر کاربردی می‌تواند به افزایش کارایی مصرف خوراک و تأمین انرژی قابل متابولیسم در نشخوارکنندگان منجر شود (Nayan *et al*., 2019; Shawrang *et al*., 2012)

ضرایب همبستگی و معادلات خط رگرسیونی

همبستگی قوی و مثبت مشاهده شده بین تولید گاز و قابلیت هضم ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی با گزارش‌های پیشین مطابقت دارد که تولید گاز را شاخصی معتبر برای برآورد تخمیر شکمبه‌ای معرفی کرده‌اند (Girma Getachew *et al*., 2004; Olfaz *et al*., 2018). تولید گاز، حاصل فعالیت میکروبی شکمبه و بازتابی از تخمیر کربوهیدرات‌های قابل‌هضم است؛ ازاین‌رو، ارتباط نزدیک آن با شاخص‌های تجزیه‌پذیری، به‌ویژه در خوراک‌های لیگنوسلولزی، قابل انتظار است.

بیشتر بودن ضرایب تعیین مدل‌های رگرسیونی برای تیمارهای فرآوری توام، حاکی از آن است که روش تولید گاز می‌تواند به‌عنوان ابزاری سریع، کم‌هزینه و کاربردی برای پیش‌بینی قابلیت هضم شکمبه‌ای ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، باید توجه داشت که روابط خطی مشاهده شده وابسته به شرایط آزمایشی بوده و ممکن است با تغییر نوع خوراک، ترکیب شیمیایی سوبسترا (مانند محتوای لیگنین و ترکیبات فنولی) یا شرایط انکوباسیون و روش اندازه‌گیری تولید گاز تغییر یابد (Suassuna *et al*., 2022).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که تلفیق پرتوتابی الکترونی و فرآوری زیستی با آنزیم های قارچ آسپرژیلوس اورایزا، با تغییر مؤثر ساختار لیگنوسلولزی کاه گندم، قابلیت تخمیر شکمبه‌ای، تجزیه‌پذیری ماده خشک و الیاف نامحلول در شوینده خنثی را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. افزایش بخش بالقوه قابل تجزیه، تسریع نرخ تجزیه و ارتقای تجزیه‌پذیری مؤثر، بیانگر هم‌افزایی دز مناسب پرتودهی و آنزیم های اورایزا و همچنین ترتیب پرتوتابی پیشین در افزایش دسترسی میکروبی و آنزیمی به دیواره سلولی است. از این‌رو، بهینه‌سازی دز پرتودهی و شرایط کشت قارچی، همراه با ارزیابی اقتصادی و بررسی پیامدهای بلندمدت بر عملکرد تولیدی و سلامت شکمبه، پیش‌نیاز کاربرد عملی این فناوری در تغذیه نشخوارکنندگان است. پیشنهاد می‌گردد به دلیل وابستگی پاسخ فرآوری با ساختار سوبسترا، بررسی فرآوری‌های توام در کنار فراوری پرتوتابی و آنزیمی مجزا انجام گیرد تا اثرات تفکیکی نیز مشخص گردد.

REFERENCES

Abid, K. (2025). Effects of Gamma Irradiation Pretreatment and Exogenous Fibrolytic Enzyme Supplementation on the Ruminal Fermentation and Nutritional Value of Typha latifolia. Fermentation, 11(6), 301, Article. https://doi.org/10.3390/fermentation1106030 ۱

Adesogan, A., Arriola, K., Jiang, Y., Oyebade, A., Paula, E., Pech-Cervantes, A.,…Vyas, D. (2019). Symposium review: Technologies for improving fiber utilization. Journal of Dairy Science, 102(6), 5726-5755, Article. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15۳۳۴

Al-Masri, M., & Guenther, K. (1999). Changes in digestibility and cell-wall constituents of some agricultural by-products due to gamma irradiation and urea treatments. Radiation Physics and Chemistry, 55(3), 323-329, Article. https://doi.org/10.1016/s۰۹۶۹-۸۰۶x(98)00333-8

Alberti, A., Bertini, S., Gastaldi, G., Iannaccone, N., Macciantelli, D., Torri, G., & Vismara, E. (2005). Electron beam irradiated textile cellulose fibres.: ESR studies and derivatisation with glycidyl methacrylate (GMA). European Polymer Journal, 41(8), 1787-1797, Article. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.016

Andlar, M., Rezić, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., & Šantek, B. (2018). Lignocellulose degradation: An overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. Engineering in life sciences, 18(11), 768-778, Article. https://doi.org/10.1002/elsc.201800039

AOAC, A. (2000). AOAC official methods of analysis of AOAC international. (17th ed.), Article.

Bak, J. S. (2014). Electron beam irradiation enhances the digestibility and fermentation yield of water-soaked lignocellulosic biomass. Biotechnology Reports, 4, 30-33, Article. https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.07.006

Bak, J. S., Ko, J. K., Han, Y. H., Lee, B. C., Choi, I.-G., & Kim, K. H .(۲۰۰۹) .Improved enzymatic hydrolysis yield of rice straw using electron beam irradiation pretreatment. Bioresource Technology, 100(3), 1285-1290, Article. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.010

Bertin, G., Spring, P., Fallon, R., & Earley, B. (.(۲۰۰۵Benefits of yeast culture (Yea-Sacc® 1026) supplementation on performance of bull calves. Proceedings of the 21st Annual Symposium „Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries"(Suppl. 1), Lexington, KY, USA, May,

Blümmel, M., & Ørskov, E. (1993). Comparison of in vitro gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting feed intake in cattle. Animal feed science and technology, 40(2-3), 109-119, Article. https://doi.org/10.1016/0377-8401(93)90150-i

Bouchard, J., Methot, M., & Jordan, B. (2006). The effects of ionizing radiation on the cellulose of woodfree paper. Cellulose, 13(5), 601-610, Article. https://doi.org/10.1007/s10570-005-9033-0

Chandra, D., Dabade, A., Damgude, G., & Malhotra, C. (2021). Effect of X-rays on structural, physicochemical and functional properties of gluten protein. Brazilian Journal of Food Technology, 24, e2020074, Article. https://doi.org/10.1590/1981-6723.07420

Chen, C., Yu, B., & Chiou, P. (2004). Roughage energy and degradability estimation with Aspergillus oryzae inclusion using Daisy® in vitro fermentation. Asian-australasian journal of animal sciences, 17(1), 53-62, Article. https://doi.org/10.5713/ajas.2004.53

Cheng, S., & Kerluke, D. R. (2003). Radiation processing for modification of polymers. ANTEC 2003 conference proceedings,

Chung, B. Y., Lee, J. T., Lee, S. S., Kim, U.-J., Wi, S. G., Bai, H.-W., & Cho, J.-Y. (2012). A comparison of the efficiency of electron beam irradiation on enzymatic hydrolysis between 4 doses of 25 kGy and a single dose of 100 kGy for bioethanol production. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 55(3), 385-389, Article. https://doi.org/10.1007/s13765-012-2021-9

Coblentz, W., & Walgenbach, R. (2010). Fall growth, nutritive value, and estimation of total digestible nutrients for cereal-grain forages in the north-central United States. Journal of animal science, 88(1), 383-399, Article. https://doi.org/10.2527/jas.2009-2224

Cone, J., Hendriks, W., Sarnklong, C., & Pellikaan, W. J. A.-A J. O. A. S. (2010). Utilization of Rice Straw and Different Treatments to Improve Its Feed Value for Ruminants: A Review. 23(5), 680-692, Article.

Diao, X., Dang, S., Liu, S., Jing, L., Wang, Y., & Zhang, W. (2020). Determination of the appropriate ratio of sample size to nylon bag area for in situ nylon bag technique evaluation of rumen digestibility of feedstuffs in sheep. Livestock Science, 241, 104254, Article. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104254

Driscoll, M., Stipanovic, A., Winter, W., Cheng, K., Manning, M., Spiese, J.,…Cleland, M. R. (2009). Electron beam irradiation of cellulose. Radiation Physics and Chemistry, 78(7-8), 539-542, Article. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.03.080

Duarte, C., Ribeiro, M., Oikawa, H., Mori, M., Napolitano, C., & Galvao, C. (2012). Electron beam combined with hydrothermal treatment for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. Radiation Physics and Chemistry, 81(8), 1008-1011, Article.

Ehlermann, D. A. E. (2016). Wholesomeness of irradiated food. Radiation Physics and Chemistry, 129, 24-29, Article. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.014

FASS, F. o. A. S., Societies. (2010). *Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Teaching and Research*. Federation of Animal Science Societies.

Fatehi, P., Alamouti, A. A., Behgar, M., & Norouzian, M. A. (2020). Effect of electron irradiation on some physical, chemical and digestion properties of pistachio by-products. Radiation Physics and Chemistry, 174, 108921, Article. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108921

Fedorah, P. M., & Hrudey, S. E. (1983). A simple apparatus for measuring gas production by methanogenic cultures in serum bottles. Environmental Technology, 4(10), 425-432, Article. https://doi.org/10.١٠٩٥٩٣٣٣٨٣٠٩٣٨۴٢٢٨/٠٨٠

Fei, X., Jia, W., & Shah, A. (2024). Techno-economic analysis of electron beam irradiation pretreatment of corn straw for anaerobic digestion. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 65, 103736, Article. https://doi.org/10.1/٠١۶j.seta.2024.103736

Getachew, G., Crovetto, G., Fondevila, M., Krishnamoorthy, U., Singh, B., Spanghero, M.,…Kailas, M. (2002). Laboratory variation of 24 h in vitro gas production and estimated metabolizable energy values of ruminant feeds. Animal Feed Science and Technology, 102(1-4), 169-180, Article. https://doi.org/10.1016/s0377-8401(02)00212-2

Getachew, G., DePeters, E. J., & Robinson, P. H. (2004). In vitro gas production provides effective method for assessing ruminant feeds. California agriculture, 58(1), Article. https://doi.org/10.3733/ca.v058n01p54

Getachew, G., Robinson, P. H., DePeters, E. J., & Taylor, S. J. (2004). Relationships between chemical composition, dry matter degradation and in vitro gas production of several ruminant feeds. Animal Feed Science and Technology, 111(1), 57-71, Article. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00217-7

Ghoorchi, T., Razavi, S., Behzad, H., Mehrabi, A., & Mastani, R. (2016). Effect of Trametes versicolor and Pleurotus ostreatus fungi on crude protein, NDF and ruminal degradability of dry matter and NDF of crops by-products. Article. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22520872.1395.5.3.6.0

Gomez-Alarcon, R., Dudas, C., & Huber, J. (1990). Influence of cultures of Aspergillus oryzae on rumen and total tract digestibility of dietary components. Journal of Dairy Science, 73(3), 703-710, Article. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(90)78723-1

Gryczka, U., Migdal, W., Chmielewska, D., Antoniak, M., Kaszuwara, W., Jastrzebska, A., & Olszyna, A. (2014). Examination of changes in the morphology of lignocellulosic fibers treated with e-beam irradiation. Radiation Physics and Chemistry, 94, 226-230, Article. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.07.007

Hajipour, M., & Shawrang, P. (2024). The effect of different levels of electron irradiation on the parameters of degradability of insoluble fibers in acid detergent, particle size distribution and relative abundance of fibrolytic bacteria in wheat straw, barley straw and sugarcane bagas. Journal of Ruminant Research, 12(4), 1-18, Article. https://doi.org/10.22069/ejrr.2024.21416.1901

Hatakka, A., & Hammel, K. E. (2011). Fungal biodegradation of lignocelluloses. Industrial applications, 319-340, Article. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11458-8_15

Henniges, U., Hasani, M., Potthast, A., Westman, G., & Rosenau, T. (2013). Electron beam irradiation of cellulosic materials—opportunities and limitations. Materials, 6(5), 1584-1598, Article. https://doi.org/10.3390/ma6051584

Henniges, U., Okubayashi, S., Rosenau, T., & Potthast, A. (2012). Irradiation of cellulosic pulps: understanding its impact on cellulose oxidation. Biomacromolecules, 13(12), 4171-4178, Article. https://doi.org/10.1021/bm3014457

Hu, H., Van den Brink, J., Gruben, B., Wösten, H., Gu, J.-D., & De Vries, R. (2011). Improved enzyme production by co-cultivation of Aspergillus niger and Aspergillus oryzae and with other fungi. International Biodeterioration & Biodegradation, 65(1), 248-252, Article. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.11.008

Jonker, A., Gruber, M., Wang, Y., Coulman, B., Azarfar, A., McKinnon, J.,…Yu, P. (2011). Modeling

degradation ratios and nutrient availability of anthocyanidin-accumulating Lc-alfalfa populations in dairy cows. Journal of Dairy Science, 94(3), 1430-1444, Article. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3604

Kapoor, K., Tyagi, A. K., Das, M., & Kumar, V. (2023). Comparative Analysis of morphological and structural changes in gamma and electron beam irradiated sugarcane bagasse. Cellul. Chem. Technol, 57, 61-70, Article. https://doi.org/10.35812/cellulosechemtechnol.2023.57.06

Karthika, K., Arun, A., & Rekha, P. (2012). Enzymatic hydrolysis and characterization of lignocellulosic biomass exposed to electron beam irradiation. Carbohydrate polymers, 90(2), 1038-1045, Article. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.040

Kasprzyk, H., Wichlacz, K., & Borysiak, S. (2004). The effect of gamma radiation on the supramolecular structure of pine wood cellulose in situ revealed by X-ray diffraction. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 7(1), 1-2, Article. http://www.ejpau.media.pl/volume7/issue1/wood/art-06.html

Kholif, A. E., Anele, A., & Anele, U. Y. (2024). Microbial feed additives in ruminant feeding. AIMS microbiology, 10(3), 542, Article. https://doi.org/10.3934/microbiol.2024026

Kim, D.-Y., Lee, B.-M., Lee, J.-Y., Kang, P.-H., & Jeun, J.-P. (2014). Electron beam irradiation and dilute alkali pretreatment for improving saccharification of rice straw. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 57(5), 591-595, Article. https://doi.org/10.1007/s13765-014-4191-0

Kong, F., Lu, N., Liu, Y., Zhang, S., Jiang, H., Wang, H.,…Li, S. (2021). Aspergillus oryzae and Aspergillus niger co-cultivation extract affects in vitro degradation, fermentation characteristics, and bacterial composition in a diet-specific manner. Animals, 11(5), 1248, Article. https://doi.org/10.3390/ani11051248

Lam, N. D., Nagasawa, N., & Kume, T. (2000). Effect of radiation and fungal treatment on lignocelluloses and their biological activity. Radiation Physics and Chemistry, 59(4), 393-398, Article. https://doi.org/10.1016/s0969-806x(00)00279-6

Matsuzawa, T. (2024). Plant polysaccharide degradation-related enzymes in Aspergillus oryzae. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 88(3), 276-282, Article. https://doi.org/10.1093/bbb/zbad177

Mehrez, A., & Ørskov, E. (1977). A study of artificial fibre bag technique for determining the dig estibility of feeds in the rumen. The Journal of Agricultural Science, 88(3), 645-650 ,Article. https://doi.org/10.1017/s0021859600037321

Menke, K., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D., & Schneider, W. (1979). The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro. The Journal of Agricultural Science, 93(1), 217-222, Article. https://doi.org/10.1017/s0021859600086305

Menke, K. H., & steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. Anim Res Dev, 28, 7-55, Article.

Michalet-Doreau, B., & Ould-Bah, M. (1992). In vitro and in sacco methods for the estimation of dietary nitrogen degradability in the rumen: a review. Animal Feed Science and Technology, 40(1), 57-86, Article. https://doi.org/10.1016/0377-8401(92)90112-j

Mikkonen, A. T., Martin, J., Upton, R. N., Barker, A. O., Brumley, C. M., Taylor, M. P.,…Roberts, M. S. (2023). Spatio-temporal trends in livestock exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) inform risk assessment and management measures. Environmental Research, 225, 115518, Article. https://doi.org/10.2139/ssrn.4215674

Moore, K. J., & Jung, H.-J. G. (2001). Lignin and fiber digestion. Article. https://doi.org/10.2458/azu_jrm_v54i4_moore

Moradi, M., Afzalzadeh, A., Behgar, M., & Norouzian, M. A. (2015). Effects of electron beam, NaOH and urea on chemical composition, phenolic compounds, in situ ruminal degradability and in vitro gas production kinetics of pistachio by-products. Veterinary Research Forum,

Motamedi, R. (2019). *Effects of fungal enzymes on iNDF content and plant cell wall digestibility parameters in ruminant's feed* M. Sc. Thesis, Urmia university, urmia, Iran. 148p.(In Persian)].

Nayan, N., van Erven, G., Kabel, M. A., Sonnenberg, A. S., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2019). Improving ruminal digestibility of various wheat straw types by white-rot fungi. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99(2), 957-965, Article. https://doi.org/10.1002/jsfa.9320

NRC. (2007). *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*. National Academy Press.

Oba, M., & Allen, M. (1999). Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. Journal of Dairy Science, 82(3), 589-596, Article. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(99)75271-9

Olfaz, M., Kilic, U., Boga, M., & Abdi, A. M. (2018). Determination of the in vitro gas production and potential feed value of olive, mulberry and sour orange tree leaves. Open Life Sciences, 13(1), 269-278, Article. https://doi.org/10.1515/biol-2018-0033

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, Article. https://doi.org/10.1017/s0021859600063048

Orynbekov, D., Amirkhanov, K., Kalibekkyzy, Z., Muslimova, N., Nurymkhan, G., Nurgazezova, A.,…Kulushtayeva, B. (2025). Effect of Electron-Beam Irradiation on Microbiological Safety, Nutritional Quality, and Structural Characteristics of Meat. Foods, 14(9), 1460, Article. https://doi.org/10.3390/foods14091460

Rodrigues, M., Pinto, P., Bezerra, R., Dias, A., Guedes, C., Cardoso, V.,…Sequeira, C. (2008). Effect of enzyme extracts isolated from white-rot fungi on chemical composition and in vitro digestibility of wheat straw. Animal Feed Science and Technology, 141(3-4), 326-33 ,۸Article. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.015

Rosser, C., Terry, S. A., Badhan, A., McAllister, T. A., & Beauchemin, K. A. (2022). Current knowledge and future opportunities for ruminant enzymes. Enzymes in Farm Animal Nutrition, 153-169, Article. https://doi.org/10.1079/9781789241563.0009

Saghebi, M., Khalilvandi-Behroozyar, H., Pirmohammadi, R., & Donyadoust-Chelan, M. (2023). Evaluation of the effects of biological processing of wheat straw by Aspergillus oryzae on rumen fermentation parameters and fiber degradability in ruminants. Article. https://doi.org/10.22069/ejrr.2022.19674.1818

Sangale, J., & Kalita, D. J. (2025). *Unlocking nutritional stratergies for smooth transition in dairy cow*. Zenex Animal Health India Pvt Ltd. https://pixie.co.in

Sarnklong, C., Cone, J., Pellikaan, W., & Hendriks, W. (2010). Utilization of rice straw and different treatments to improve its feed value for ruminants: a review. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 23(5), 680-692, Article. https://doi.org/10.5713/ajas.2010.80619

Sarosi, O. P., Bischof, R. H., & Potthast, A. (2020). Tailoring pulp cellulose with electron beam irradiation: effects of lignin and hemicellulose. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(18), 7235-7243, Article. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02165.s001

Shahbazi, H., Sadeghi, A., Fazaeli, H., Raisali, G., Chamani, M., & Shawrang, P. (2008). Effects of electron beam irradiation on dry matter degradation of wheat straw in the rumen. Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS, 11(4), 676-679, Article. https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.676.679

Shawrang, P., Majdabadi, A., & Sadeghi, A. A. (2012). Changes in cell wall compositions and degradation kinetics of electron beam-irradiated sugarcane bagasse. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences, 36(5), 527-532, Article. https://doi.org/10.3906/vet-1101-692

Shawrang, P., Nikkhah, A., Zare-Shahneh, A., Sadeghi, A., Raisali, G., & Moradi-Shahrebabak, M. (2008). Effects of gamma irradiation on chemical composition and ruminal protein degradation of canola meal. Radiation Physics and Chemistry, 77(7), 918-922, Article. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2008.03.006

Souza, J. M. d., Souza, J. C. d. S. M. d., Sousa, D., Del Valle, T. A., Ghizzi, L. G., Alcântara, A .H. D. d.,…Balieiro, J. C. d. C. (2021). The effects of compound treatment of Aspergillus oryzae and fibrolytic enzyme on in vitro degradation, gas production and fermentative profile of maize silage and sugarcane silage. The Journal of Agricultural Science, 159(1-2), 147-158, Article. https://doi.org/10.1017/s002185962100037x

Suassuna, J. M., Andrade, A. P. d., Menezes, D. R., Teles, Y. C., Araujo, C. M., Lima, L. K.,…Medeiros, A. N. (2022). Accuracy of techniques for predicting gas production by ruminants associated with diet. Fermentation, 9(1), 39, Article. https://doi.org/10.3390/fermentation9010039

Sun, H., Wu, Y., Wang, Y., Liu, J., & Myung, K. (2014). Effects of Aspergillus oryzae culture and 2-hydroxy-4-(methylthio)-butanoic acid on in vitro rumen fermentation and microbial populations between different roughage sources. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 27(9), 1285, Article. https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13742

Sun, H., Wu, Y., Wang, Y., Wang, C., & Liu, J. (2017). Effects of addition of Aspergillus oryzae culture and 2-hydroxyl-4-(methylthio) butanoic acid on milk performance and rumen fermentation of

dairy cows. Animal Science Journal, 88(4), 602-609, Article. https://doi.org/10.1111/asj.12646

Takalloozadeh, M., Dayani, O., Tahmasbi, R., & Khezri, A. (2013). Determination of chemical composition, physical characteristics and nutritive value of treated Walnut hull by Neurospora Sitophila through nylon bag and gas production methods. Iranian Journal of Animal Science Research, 6,۲۴۸-۲۵۷. https://doi.org/10.22067/ijasr.v6i3.23949

Thakur, S., Shrivastava, B., Ingale, S., Kuhad, R. C., & Gupte, A. (2013). Degradation and selective ligninolysis of wheat straw and banana stem for an efficient bioethanol production using fungal and chemical pretreatment. 3 Biotech, 3(5), 365-372, Article. https://doi.org/10.1007/s13205-012-0102-4

Uwineza, C., Parchami, M., Bouzarjomehr, M., Taherzadeh, M. J., & Mahboubi, A. (2024). Recent developments in the application of filamentous fungus Aspergillus oryzae in ruminant feed. Animals, 14(16), 2427, Article. https://doi.org/10.3390/ani14162427

Van Horn, H., Zometa, C., Wilcox, C., Marshall, S., & Harris Jr, B. (1979). Complete rations for dairy cattle. VIII. Effect of percent and source of protein on milk yield and ration digestibility. Journal of Dairy Science, 62(7), 1086-1093, Article. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(79)83379-2

Van Kuijk, S., Sonnenberg, A., Baars, J., Hendriks, W., & Cone, J. (2015). Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: a review. Biotechnology advances, 33(1), 191-202, Article. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.014

van Kuijk, S. J., Sonnenberg, A. S., Baars, J. J., Hendriks, W. H., del RÝo, J. C., Rencoret, J.,…Cone, J .W. (2017). Chemical changes and increased degradability of wheat straw and oak wood chips treated with the white rot fungi Ceriporiopsis subvermispora and Lentinula edodes. Biomass and bioenergy, 105, 381-391, Article. https://doi.org/10.1016/j.biombioe۲۰۱۷/۰۷/۰۰۳.

Van Soest, P. J. (2018). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell university press.

Van Soest, P. v., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of Dairy Science, 74(10), 3583-3597, Article. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(91)78551-2

Vanzant, E. S., Cochran, R. C., & Titgemeyer, E. C. (1998). Standardization of in situ techniques for ruminant feedstuff evaluation. Journal of animal science, 76(10), 2717-2729, Article. https://doi.org/10.2527/1998.76102717x

Waldrip, H., & Martin, S. (1993). Effects of an Aspergillus oryzae fermentation extract and other factors on lactate utilization by the ruminal bacterium Megasphaera elsdenii. Journal of Animal Science, 71(10), 2770-2776, Article. https://doi.org/10.2527/1993.71102770x

Wang, J., Ma, D., Lou, Y., Ma, J., & Xing, D. (2023). Optimization of biogas production from straw wastes by different pretreatments: Progress, challenges, and prospects. Science of The Total Environment, 905, 166992, Article. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166992

Wiedmeier, R., Arambel, M., & Walters, J. (1987). Effect of yeast culture and Aspergillus oryzae fermentation extract on ruminal characteristics and nutrient digestibility. Journal of Dairy Science, 70(10), 2063-2068, Article. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(87)80254-0

Xv, W., Zheng, Q.-W., Ye, Z.-W., Wei, T., Guo, L.-Q., Lin, J.-F., & Zou, Y. (2024). Submerged culture of edible and medicinal mushroom mycelia and their applications in food products: a review. International Journal of Medicinal Mushrooms, 26(3), Article. https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.2023052039

Zhao, X., Zhang, L., & Liu, D. (2012). Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. Biofuels, bioproducts and biorefining, 6(4), 465-482, Article. https://doi.org/10.1002/bbb.1331

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li ,Y. (2020). Enhancement of enzymatic digestibility of lignocellulosic biomass through combined physical and biological pretreatments. Chemosphere, 240, 124868, Article. 10.1016/j.chemosphere.2019.124868