بررسی اثرات متقابل اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما بر ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی پلت‌های تولیدی از ضایعات پوست سبز پسته برای استفاده در خوراک دام

کاظم لائی[۱]، محمد حسین کیانمهر[۲]، قنبر لائی[۳]*

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

چکیده

پوست سبز پسته، به‌عنوان یک ضایعه کشاورزی با پتانسیل بالا، در بسیاری از مناطق مورد بی‌توجهی قرار می‌گیرد. این مطالعه به بررسی اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر خواص مکانیکی و شیمیایی پلت‌های تولیدی از ضایعات پوسته سبز پسته به‌عنوان خوراک دام پرداخته است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر دما، مواد افزودنی و اندازه ذرات به‌طور مستقل بر دوام، نیروی ماکزیمم شکست، انرژی شکست و چقرمگی پلت‌ها اثرمعناداری داشتند. بیشترین اثر مثبت بر دوام، نیروی ماکزیمم شکست، انرژی شکست و چقرمگی در تیمار با مواد افزودنی ۵۰ درصد، دمای ۸۰ درجه سلسیوس و اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر مشاهده شد. در پژوهش حاضر بیشترین کاهش میزان ترکیبات فنولی و تانن پلت‌های تولیدشده از ضایعات پوسته سبز پسته با سطوح مختلف در جیره دام در تیمار دما ۸۰ درجه سلسیوس و مواد افزودنی ۸۰ درصد به میزان ۷۹ و ۸۱ درصد کاهش در مقایسه با پوسته سبز پسته پلت نشده را داشت. همچنین برای میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی در تیمار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس و مواد افزودنی ۸۰ درصد و اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر نتایج مطلوبی به دست آمد، به‌طوری‌که برای میزان لیگنین نامحلول و میزان فیبر نامحلول در مواد شوینده اسیدی و میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی به‌ترتیب ۵۸، ۵۰ و ۳۰ درصد کاهش نسبت به پوسته سبز پسته فرآوری نشده (پلت نشده) مشاهده شد. این یافته‌ها حاکی از این است که استفاده بهینه از این پارامترها نه‌تنها کیفیت خوراک دام را بهبود می‌بخشد، بلکه از نظر اقتصادی و کارایی تولید نیز مؤثر است

واژه‌های کلیدی: پسمانده پوسته سبز پسته، خواص کمی و کیفی پلت، خوراک دام

[۱] دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
[۲] استاد، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۳] مرکز تحقیقات محصولات زراعی و باغی استراتژیک، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران.
* نویسنده مسئول: GH.LAEI@iau.ac.ir : Laey1356@gmail.com

مقدمه

افزایش تقاضا برای غذا و خوراک، همراه با مقادیر زیاد ضایعات و دورریزهای زنجیره تأمین کشاورزی و صنایع غذایی، چالش‌های متعددی در حوزه‌های اجتماعی و اقتصادی ایجاد کرده است. در این راستا، استفاده از خوراک‌های جایگزین، شامل محصولات کشت و صنعت و ضایعات مواد غذایی، به‌عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به غلات و دانه‌های روغنی و همچنین کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد در بسیاری از کشورها با هدف کاهش هزینه‌های تولید دام، کاهش ضایعات مواد مغذی و ارتقای پایداری زیست‌محیطی در کشاورزی و صنایع غذایی به کار گرفته شده است (Dou *et al*., 2018; Pinotti *et al*., 2023).

با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این جایگزین‌ها مستلزم غلبه بر چالش‌هایی مانند حفظ ارزش غذایی، افزایش ایمنی و بهینه‌سازی فرآیندهای استفاده از آن‌ها در خوراک دام است (Salemdeeb *et al*., 2017). یکی از این منابع جایگزین، پوست سبز پسته است که به‌عنوان یکی از ضایعات گسترده باغی در کشور شناخته می‌شود. این ضایعات در فرآیند پوست‌گیری پسته تولید شده و به دلیل حجم بالا و مدت کوتاه تولید (دو تا سه ماه)، مصرف مناسبی ندارد. در نتیجه، کشاورزان اغلب آن را سوزانده یا دفن می‌کنند که این امر منجر به اتلاف منابع ارزشمند و ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود (Salihoglu *et al*., 2018; Golmohammadi & Razavi, 2012). بااین‌حال، در صورت استفاده بهینه، پوست سبز پسته می‌تواند به‌عنوان منبع ارزشمندی در تولید خوراک دام مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

ضایعات پسته شامل مجموعه‌ای از مواد مانند خوشه‌ها، پوسته نرم، برگ‌ها، پوسته سخت و مغز آن است که در کارخانجات فرآوری پسته تولید می‌شود (Kazemi *et al*., 2024). با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد هزینه‌های پرورش دام مربوط به تأمین خوراک است و بخش قابل‌توجهی از آن از طریق واردات تأمین می‌شود، استفاده از ضایعات کشاورزی، به‌ویژه پوست سبز پسته، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش وابستگی به واردات و بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان و دامداران باشد (گل محمدی و رضوی ۱۳۹۱). فاضلی (۱۳۸۶) و فروغ عامری (۱۳۷۶) نشان داده‌اند که ضایعات پسته در صورت فرآوری صحیح، به‌ویژه با کاهش اثرات مضر تانن، می‌توانند در جیره غذایی دام قرار گیرند و ارزش تغذیه‌ای مطلوبی ارائه دهند.

در یکی از مطالعات، اثر استفاده از پسماندهای پسته در تغذیه بزغاله‌های پرواری بررسی شد. در این پژوهش، تأثیر افزودن آلومینوسیلیکات و پلی‌اتیلن گلیکول (با دوز ۱۰ گرم بر کیلوگرم ماده خشک) به جیره غذایی مبتنی بر پسماند پوست پسته بر ۴۰ رأس بزغاله نر مهابادی (۵ ماهه، وزن بدن ۲۲ کیلوگرم) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از پسماند پسته به‌تنهایی (۴۰ درصدجیره) باعث کاهش عملکرد رشد می‌شود، اما افزودن آلومینوسیلیکات و پلی‌اتیلن گلیکول اثرات منفی را کاهش

داده و قابلیت هضم و فعالیت‌های تخمیری شکمبه را بهبود می‌بخشد (Kazemi *et al*., 2024).

استفاده از فرآورده‌های فرعی در تغذیه دام، علی‌رغم مزایای آن، همواره با محدودیت‌هایی همراه بوده است. به‌عنوان مثال، کنجاله سویا یکی از مهم‌ترین منابع پروتئینی در خوراک دام است، اما بیش از ۸۰ درصد تولید جهانی آن از سه کشور آرژانتین، برزیل و ایالات متحده آمریکا تأمین می‌شود (Kuepper & Stravens, 2022). این وابستگی، ضرورت مطالعه بر روی محصولات جانبی کشاورزی و صنعتی جایگزین را برای افزایش پایداری سیستم‌های دامداری در سطح محلی برجسته می‌کند.

یکی از روش‌های مؤثر، فرآوری پوست سبز پسته از طریق پلت‌سازی است. فرآیند پلت‌سازی نه‌تنها اثرات منفی تانن را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق بهبود هضم‌پذیری، افزایش اشتها و کاهش انرژی موردنیاز برای هضم، کیفیت خوراک را ارتقا می‌دهد. در مطالعه‌ای، تأثیر اندازه ذرات پلت بر مصرف پروتئین و نسبت کارایی پروتئین در پرندگان بررسی شد. طبق نتایج، پرندگان تغذیه‌شده با پلت‌های یک میلی‌متری نسبت کارایی پروتئین بهتری داشتند (۱/۶۴) و عملکرد تغذیه‌ای آن‌ها بهبود یافت (Sogunle *et al*., 2013). فرآیند پلت‌سازی موجب افزایش فراهمی پروتئین و نشاسته در خوراک دام شده که باعث بهبود هضم و افزایش کارایی خوراک می‌شود (Tumuluru, 2021). علاوه براین، مصرف خوراک پلت‌شده موجب کاهش زمان صرف‌شده برای جویدن، افزایش کارایی دام، صرفه‌جویی در انرژی، جلوگیری از جداسازی اجزای مختلف خوراک و بهبود کیفیت تغذیه و عملکرد دام‌ها می‌شود (Tumuluru, 2021).

Franklin *et al* (۲۰۰۳) در تحقیقات خود گزارش کردند که گوساله‌های تغذیه‌شده با خوراک آغازین پلت‌شده، از ترکیبی دقیق و مهندسی‌شده از مواد مغذی بهره‌مند بودند که به‌منظور تأمین نیازهای رشدی گوساله‌های جوان طراحی شده بود. در فرمولاسیون این پلت‌ها از مواد اولیه باکیفیتی همچون ذرت شکسته، آرد گندم، آرد گلوتن ذرت، ملاس، آرد خون، یونجه خشک، آب پنیر خشک و دانه‌های خشک تقطیر ذرت استفاده شده بود. این ترکیب، از نظر میزان مواد مغذی با سایر خوراک‌ها تفاوت داشت و منجر به افزایش وزن روزانه و کاهش مصرف خوراک آغازین در مقایسه با دیگر جیره‌های غذایی شد (Franklin *et al*., 2003). در پژوهشی، Laei et al (۲۰۲۴) نشان دادند که استفاده از دستگاه پلت‌ساز برای تولید پلت از ضایعات پوست سبز پسته موجب بهبود خواص مکانیکی و کیفیت خوراک دام شده و ترکیبات ضدتغذیه‌ای را کاهش می‌دهد (Laei *et al*., 2024). همچنین، در مطالعه دیگری لائی و همکاران (۱۴۰۲) مشخص شد که تنظیمات بهینه فرآیند پلت‌سازی می‌تواند هزینه‌های حمل‌ونقل و آلودگی محیطی را کاهش و کیفیت خوراک دام را ارتقا دهد.

هدف از این پژوهش، بررسی اثر فرآوری پوست سبز پسته از طریق پلت‌سازی بر بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای،

کاهش ترکیبات ضدتغذیه‌ای و ارتقای پایداری زیست‌محیطی در خوراک دام است. در این راستا، تأثیر عوامل مختلف رطوبت اولیه، دما، اندازه ذرات و شرایط فرآیند بر کیفیت فیزیکی و ارزش تغذیه‌ای پلت‌های تولیدشده مورد ارزیابی قرار گرفت تا امکان بهره‌برداری بهینه از این ضایعات کشاورزی در تغذیه دام فراهم شود.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی ضایعات پوست سبز پسته

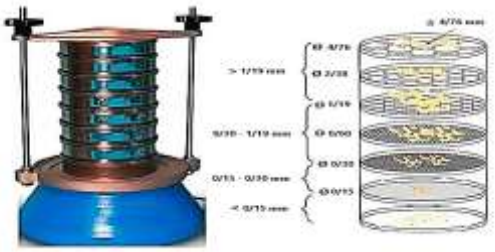
با توجه به این‌که شهرستان سبزوار در استان خراسان رضوی یکی از قطب‌های اصلی تولید پسته در کشور به‌شمار می‌رود، مواد اولیه شامل بقایای پوست سبز پسته به میزان ۲۰۰ کیلوگرم از باغ‌های این منطقه تهیه شد.

رطوبت اولیه نمونه‌های تازه بین ۶۰ تا ۷۵ درصد اندازه‌گیری گردید. به‌منظور کاهش رطوبت و جلوگیری از رشد کپک و تخمیر ناخواسته، مواد در فضای آزاد و در سایه، بر روی سینی‌های توری فلزی با ضخامت تقریبی سه تا پنج سانتی‌متر در لایه‌های نازک پهن شدند. محل نگهداری دارای تهویه طبیعی مناسب و پوشش توری برای جلوگیری از نفوذ گردوغبار و حشرات بود.

فرآیند خشک‌کردن در شرایط طبیعی محیط (دمای متوسط روزانه ۲۸ تا ۳۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۲۵ تا ۳۵ درصد) به‌مدت دو هفته ادامه یافت تا رطوبت مواد به حدود ۱۲ درصد (بر پایه وزن تر) کاهش یابد. در طول خشک‌کردن، مواد هر ۱۲ ساعت یک‌بار به‌صورت دستی زیر و رو شدند تا از ته‌نشینی رطوبت و رشد کپک جلوگیری شود. پس از رسیدن به رطوبت مطلوب، نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ضخیم، در محیط خشک و خنک نگهداری و سپس برای انجام فرآیندهای آسیاب و پلت‌سازی به آزمایشگاه گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران منتقل شدند.

بقایای پسته تهیه‌شده به‌طور متوسط شامل ۶۲ درصد پوسته سبز، ۲۶ درصد خوشه، ۱۱ درصد برگ و یک درصد مغز و پوسته چوبی بود. این مواد پس از جمع‌آوری و خشک‌کردن اولیه، توسط آسیاب چکشی چندکاره تک‌فاز مدل ۰۰۱۱۲ (ساخت ایران) با ظرفیت ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم در ساعت آسیاب شدند. فرآیند آسیاب‌کردن در سه مرحله متوالی (هر بار به مدت تقریباً سه دقیقه) انجام شد تا اندازه ذرات به میانگین هندسی حدود نیم و یک میلی‌متر (معادل مش‌های ۳۰ و ۱۶) کاهش یابد.

برای انجام عملیات اندازه‌گیری، مجموعه‌ای از الک‌ها با اندازه سوراخ‌های کاهنده از بالا به پایین در دستگاه شیکر الک برقی آزمایشگاهی (مدل KG 531، ساخت ایران) قرار گرفتند (شکل ۱). به‌منظور تعیین میانگین هندسی طول ذرات، مقدار ۱۰۰ گرم از پوسته سبز پسته آسیاب‌شده بر روی بالاترین الک ریخته شد و دستگاه به‌مدت پنج دقیقه در فرکانس استاندارد ۵۰ هرتز و دامنه لرزش متوسط طبق روش ASAE S319.3 به کار گرفته شد. سپس، میانگین هندسی طول ذرات با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (ASAE, 2006).



شکل ۱- الک شیکر برقی برای تعیین میانگین هندسی طول ذرات.

رابطه (۱)
$$d_{gw} = \log^{-1}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i \log \bar{d}_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right]$$

که در این رابطه، dgw، میانگین هندسی طول ذرات (میلی‌متر)؛ wi، وزن روی الک i اُم (گرم)؛ n، تعداد الک‌ها به‌علاوه یک و $\bar{d}_i$، اندازه سوراخ الک i اُم (میلی‌متر) است.

مواد افزودنی

با افزایش استفاده از خوراک پلت‌شده در تغذیه دام، متخصصان تغذیه حیوانات به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و افزایش مقاومت مکانیکی پلت‌ها توجه ویژه‌ای نشان داده‌اند. پایداری فیزیکی پلت نقش مهمی در جلوگیری از خردشدگی، کاهش تلفات مواد مغذی و یکنواختی مصرف خوراک دارد (Blakely *et al*., 1955). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در جیره‌هایی که گندم کمتر از ۱۰ درصد حضور دارد، برای دستیابی به پلت‌هایی با پایداری بالا، استفاده از مواد چسباننده نظیر بنتونیت سدیم، لیگنوسولفونات، و ملاس ضروری است (Kaliyan & Morey, 2010).

در این پژوهش، به‌منظور بهبود ارزش تغذیه‌ای و افزایش استحکام فیزیکی پلت‌های حاصل از پوست سبز پسته، از مواد افزودنی طبیعی شامل آرد جو، آرد ذرت و تفاله خشک چغندر قند استفاده شد. نسبت این افزودنی‌ها بر اساس ترکیب انرژی-پروتئین مکمل پوست سبز پسته و با هدف دستیابی به پایداری بهینه پلت انتخاب گردید.

چهار سطح تیماری شامل ۰، ۲۰، ۵۰ و ۸۰ کیلوگرم مواد افزودنی به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم پوست سبز پسته خشک در نظر گرفته شد (شکل ۲). انتخاب این سطوح بر مبنای طراحی سطح پاسخ و با هدف بررسی رفتار غیرخطی پاسخ‌های فیزیکی و تغذیه‌ای نسبت به درصد افزودنی‌ها انجام گرفت (Montgomery, 2017).

برای افزایش پایداری فیزیکی پلت‌ها و مطابق با نتایج مطالعات قبلی که نشان داده‌اند بنتونیت سدیم پردازش‌شده در محدوده یک تا دو درصد می‌تواند کیفیت پلت را بهبود بخشد (Attar *et al*., 2019; Pour *et al*., 2021). در این پژوهش از بنتونیت سدیم به میزان دو

کیلوگرم برای هر ۱۰۰ کیلوگرم پوست سبز پسته (دو درصد) استفاده شد.

در این پژوهش، از اوره به میزان سه درصد در ترکیب با پوست سبز پسته استفاده شد تا به‌عنوان منبع نیتروژن غیرآمینه‌ای[1] موجب بهبود ارزش پروتئینی پلت‌ها گردد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از سطوح مشابه اوره (تا سه درصد در ماده خشک جیره) موجب بهبود تخمیر شکمبه و افزایش قابلیت هضم پروتئین و رشد در گوسفندان می‌شود (Sultana *et al*., 2021).

فاصله غیریکنواخت بین سطوح تیماری با هدف مدلسازی دقیق‌تر منحنی پاسخ و امکان تفسیر روابط غیرخطی بین درصد افزودنی‌ها و شاخص‌های فیزیکی پلت (نظیر سختی، پایداری و دانسیته) در چارچوب مدل رگرسیون درجه دوم انتخاب گردید (Montgomery, 2017).

شکل ۲- تهیه نمونه‌های پوسته سبز پسته در نسبت‌های مختلف با مواد افزودنی.

تعیین میزان رطوبت مواد اولیه

برای تعیین میزان رطوبت اولیه مواد، از استاندارد (AACC, 1999) استفاده شد و میزان رطوبت اولیه مواد نه درصد تعیین گردید. سپس، رطوبت بر اساس ۱۲ درصد به‌عنوان استاندارد، طبق روش (Lai *et al.*, 2023) تنظیم گردید و محاسبات رطوبت بر پایه‌تر مطابق رابطه (۲) انجام شد.

$$MC(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times ۱۰۰$$

که در این رابطه: MC مقدار رطوبت بر پایه تر (درصد)، m_i جرم اولیه مواد (گرم)، m_f جرم نهایی مواد خشک‌شده در آون (گرم) است.

فرآیند تولید پلت با دستگاه پلت‌ساز، بهینه‌سازی شده برای ضایعات پوسته سبز پسته

برای تولید پلت‌ها با استفاده از دستگاه پلت‌ساز از پوسته سبز پسته، ابتدا مخلوط خوراک دام حاصل از پوسته سبز پسته آماده گردید و سپس داخل مخزن اکسترودر ریخته شد (شکل ۳). این دستگاه مجهز به پنج عدد کمربند حرارتی سرامیکی است که با استفاده از یک

سنسور دما (K) نصب‌شده در خروجی مواد از اکسترودر، دما را اندازه‌گیری و کنترل می‌کند. در این آزمایش، دما در سه سطح مختلف (۵۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس) تنظیم شد.

مواد داخل اکسترودر با چرخش پیچ ورزدهنده به‌طور یکنواخت انتقال یافته و به‌صورت خمیری یکدست تبدیل می‌شوند. سپس این مواد به داخل مخزن دستگاه پلت‌ساز هدایت شدند. در دستگاه پلت‌ساز، سه عدد غلتک مخروطی شکل شروع به دوران می‌کنند تا لایه‌ای از ماده خوراکی بر روی سطح قالب ثابت با قطر سوراخ‌های هشت میلی‌متر ایجاد گردد. با هر بار عبور غلتک‌ها و تکرار این سیکل، مواد بیشتری داخل سوراخ‌های قالب متراکم می‌شد و به شکل پلت‌های استوانه‌ای هم‌قطر با سوراخ‌های قالب از آن خارج می‌شد (شکل ۴). همچنین، با تغییر موقعیت تیغه برش در زیر دای، پلت‌های تولیدشده به طول دلخواه بریده می‌شد (Lai *et al.*, 2023b).

شکل ۳- دستگاه پلت‌ساز پوسته سبز پسته.

شکل ۴- نمونه‌های پلت تولید شده حاصل از ضایعات پوسته سبز پسته با مواد افزودنی در سطوح مختلف.

آزمون ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی پلت‌های تولیدشده از پوست سبز پسته

تعیین جرم حجمی توده

برای تعیین جرم حجمی، پوسته سبز پسته آسیاب شده در داخل یک ظرف با ابعاد مشخص ریخته شد تا

ظرف به طور کامل پر شود. سپس مقدار اضافه ماده خوراکی که از ظرف سرریز می‌شود، با استفاده از یک خط‌کش و حرکت زیگزاگی بر روی دهنه ظرف، تخلیه گردید تا یک ظرف کاملاً پر و بدون فشردگی اولیه از مواد حاصل شود. پس از این مرحله، با در نظر گرفتن ابعاد ظرف، حجم آن محاسبه گردید. سپس جرم مواد داخل ظرف با استفاده از ترازوی دیجیتال (مدل LUTRON GM-300P، آلمان) با دقت ۰/۰۱ ± گرم اندازه‌گیری شد. مقدار جرم حجمی از رابطه (۳) برای بقایای پسته ۴۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد (Laei *et al.*, 2023c).

$$p = \frac{m}{v} \qquad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه ۳: p، برابر چگالی توده نمونه (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ m، جرم نمونه (کیلوگرم)؛ v، حجم نمونه (مترمکعب) است.

خصوصیات مکانیکی

دستگاه آزمون مواد بیولوژیک که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری انرژی شکست، نیروی شکست و چقرمگی پلت‌ها به کار گرفته شد. در این آزمایش، پلت بر روی فک ثابت دستگاه در راستای محور افقی قرار گرفت. فک متحرک به لودسل متصل بود و با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت می‌کرد (Laei e*t al.*, 2023c). در طول آزمایش، نیروی وارد شده توسط لودسل بر روی سطح استوانه‌ای پلت اعمال می‌شد تا زمانی که ترک یا شکست در پلت ایجاد گردد. این نقطه شکست در نمودار نیرو-جابه‌جایی به‌صورت سقوط نقطه‌ای قابل مشاهده است.

شکل ۵- (الف) دستگاه آزمون مکانیکی مواد بیولوژیک (ب) نحوه اعمال نیرو در راستای محور افقی پلت

نقطه تسلیم بیولوژیک، نقطه‌ای در منحنی نیرو-تغییر شکل است که در آن نیرو به‌طور لحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند و سپس افزایش می‌یابد. این نقطه، گسیختگی را در ماده نشان می‌دهد. همچنین، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بیانگر میزان انرژی موردنیاز برای شکست پلت

است با بهره‌گیری از رابطه (۴) محاسبه گردید (Laei *et al.*, 2023c).

$$E=\frac{1}{2}Fr \times Dr$$ رابطه (۴)

در این رابطه E، انرژی لازم جهت شکستن پلت‌ها (میلی‌ژول)؛ Fr، ماکزیمم نیروی لازم جهت شکستن پلت‌ها (نیوتن)؛ Dr، جابجایی معادل مقدار ماکزیمم نیرو (میلی‌متر).

انرژی شکست و چقرمگی پلت‌های تولیدی

چقرمگی به‌عنوان مقدار کاری تعریف می‌شود که بر حجم یک جسم وارد می‌شود تا شکستگی در آن ایجاد گردد. از آنجا که سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی نمایانگر کار انجام‌شده برای شکست نمونه‌ها است، چقرمگی ظاهری پلت‌های تولیدشده بر اساس تخمین حجم پلت‌ها با استفاده از فرمول محاسباتی ذکرشده در بخش‌های قبلی محاسبه گردید. برای به دست آوردن چقرمگی ظاهری پلت، از رابطه (۵) استفاده شد (Laei *et al.*, 2023c).

$$TO = \frac{E_a}{\mathrm{V}}$$ رابطه (۵)

که در این رابطه۵: TO چقرمگی (میلی ژول بر مترمکعب)؛ V، حجم نمونه (میلی‌مترمکعب)؛ E_a انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها (میلی ژول) است.

آزمون دوام پلت‌ها تولیدی

دوام و پایداری یکی از ویژگی‌های مهم پلت‌ها می‌باشد. از این جهت که پلت‌ها بتوانند با فشارهای ناشی از جابجایی حمل‌ونقل بدون خرد شدن و ترک‌خوردگی را تحمل کنند (McMahon *et al.*, 1999). به‌منظور اندازه‌گیری دوام پلت‌های حاصل‌شده از پوسته سبز پسته از دستگاه تست دوام استفاده شد (شکل ۶). این دستگاه شامل یک محفظه مکعب مستطیلی از جنس استیل با ابعاد ۱۲۵×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد که یک صفحه ضربه زن مستطیلی شکل با ابعاد ۵۰×۲۳۰ میلی‌متر روی قطر یکی از یال‌ها و در فاصله مساوی از دو رأس مربع و به‌صورت عمود بر یال نصب شده است. این محفظه توسط یک محور که به‌وسیله دو یاتاقان نگه داشته شده است. به یک الکتروگیربکس (۵ تا ۲۰۰ دور در دقیقه) متصل می‌شود (Standard , 2002).

شکل ۶- دستگاه آزمون دوام ساخته‌شده بر اساس استاندارد ASAE S269/4.

روش تست دوام پلت عبارت‌اند از: ۱- الک کردن پلت‌ها با الک استاندارد حدود ۰/۸ میلی‌متر، ۲- قرار دادن ۵۰۰ گرم از نمونه داخل دستگاه تست دوام و روشن کردن دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه با تنظیم سرعت ۵۰ دور در دقیقه، ۳- الک کردن مجدد نمونه‌های خارج‌شده از محفظه دستگاه، ۴- وزن کردن مواد باقیمانده روی الک. دوام پلت‌ها (DU)[1] به‌صورت درصد با استفاده از مقادیر جرم پلت‌های سالم باقیمانده (mc) و جرم کل پلت‌های سالم اولیه (mi) مطابق رابطه ۶ محاسبه شد (Laei e*t al.,* 2023c).

$$DU = \frac{m_c}{m_i} \times ۱۰۰$$ رابطه (۶)

بررسی خواص ضد تغذیه‌ای پلت‌های تولیدشده حاصل از پوست سبز پسته

فیبر نامحلول شوینده اسیدی، خنثی و لیگنین نامحلول شوینده اسیدی

میزان فیبر نامحلول در شوینده اسیدی[2] و میزان فیبر نامحلول در شوینده خنثی[3] نمونه ها توسط دستگاه مدل Fibertecsystem tecator، سوئد اندازه‌گیری شد. جهت تعیین لیگنین نامحلول شوینده اسیدی[4]، باقیمانده نمونه‌ها از مرحله قبل (فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی با استفاده از اسید سولفوریک ۷۲ درصد (رقیق شده با آب مقطر) به ازای هر نمونه به مدت سه ساعت قرار داده شد. سپس با آب داغ شستشو داده و در ادامه صاف و خشک شد (Van Soet *et al*., 1991).

ترکیبات فنولی و تانن

مقدار کل ترکیبات فنولی توسط روش فولین شیکالتو اندازه‌گیری شد (Makkar *et al.,* 1993). مقدار کل تانن از طریق محاسبه میزان اختلاف ترکیبات فنولی قبل و بعد از واکنش با پلی وینیل پیرولیدون به دست آمد. ۱۰ میلی-لیتر استون ۷۰ درصد به لوله آزمایش حاوی ۱۰۰ میلی-گرم نمونه خشک‌شده جهت استخراج ترکیبات فنولی اضافه شد. سپس کربنات سدیم ۲۰ درصد، فنول فولین شیکالتو (یک مولار) و ۰/۹ میلی‌لیتر آب مقطر به ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره استونی اضافه‌شده پس از مخلوط شدن به مدت ۳۵ دقیقه در دمای اتاق نگهداری شد و سپس در طول‌موج ۷۲۵ نانومتر (A) ۷۲۵ عدد جذب آن توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. با استفاده از محلول اسید تانیک در غلظت‌های مختلف منحنی استاندارد رسم و سپس مقدار ترکیبات فنولی و تانن نمونه محاسبه شد شد.

تجزیه و تحلیل آماری

این آزمایش بصورت فاکتوریل با سه عامل که فاکتور اول اندازه ذرات در دو سطح (۰/۵ و ۱ میلی‌متر)، فاکتور دوم مواد افزودنی در چهار سطح (۰، ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد) و فاکتور سوم دما در سه سطح (۵۰، ۷۰ و ۸۰ درجه

1-Durability

2 - Acid Detergent Insoluble Fiber
3 - Neutral Detergent Insoluble Fiber
4- Acid Detergent Insoluble Lignin

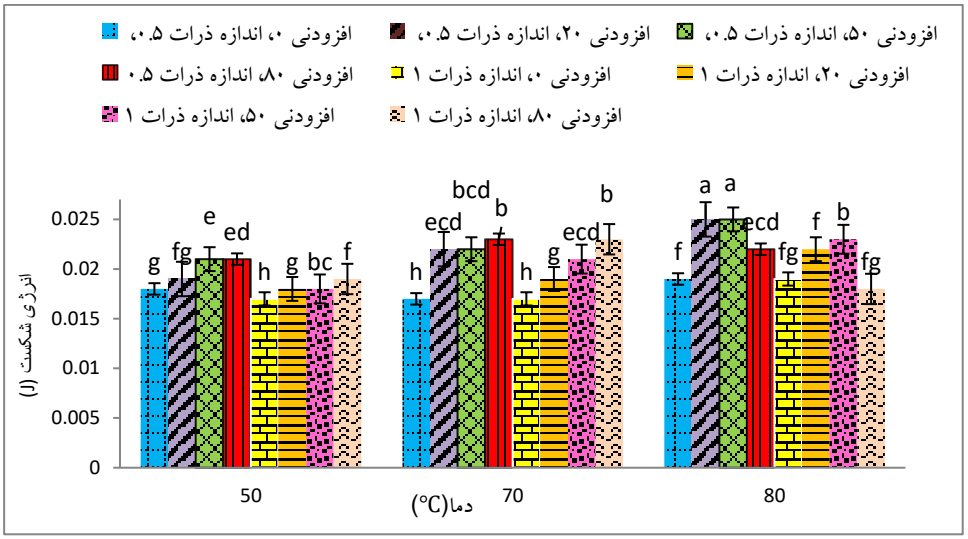
سلسیوس) بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی پلت‌های تولیدشده از ضایعات پوسته پسته در قالب طرح پایه کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفت. پس از جمع‌آوری اطلاعات، تجزیه داده ها توسط نرم افزار SAS9.3 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. جهت تعیین ارتباط بین متغیرها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید و رسم نمودارها توسط نرم افزار Excel 2013 انجام شد. در نهایت جهت ارزیابی دقت اندازه‌گیری‌ها و اطمینان از معتبر بودن نتایج، ضریب تغییرات (CV) نیز محاسبه شدکه این اقدامات به‌منظور تضمین صحت و اعتبار نتایج و تحلیل‌های آماری انجام گردید.

نتایج و بحث

اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر خواص مکانیکی پلت ضایعات پوسته سبز پسته برای تغذیه دام

میزان انرژی شکست پلت‌ها

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان انرژی شکست نشان داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما؛ و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد بیشترین شکست در ترکیب تیماری ۵۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با ۴۸۸۰/۸۴ نیوتن و کمترین انرژی شکست در ترکیب تیمار صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات یک میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ۶۱۰/۳۶۱ نیوتن مشاهده شد (شکل ۷). نتایج نشان داد که استفاده از مواد افزودنی مناسب در ترکیب با اندازه ذرات ریزتر و دمای بالاتر می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی پلت‌ها را بهبود بخشد. همچنین در صورت عدم استفاده از مواد افزودنی (صفر درصد) و افزایش اندازه ذرات و دمای پایین می تواند باعث کاهش میزان انرژی شکست شود که دلیل آن عدم وجود مواد افزودنی برای ایجاد پیوندهای مناسب بین ذرات، اندازه ذرات درشت‌تر و عدم تغییرات ساختاری مطلوب تحت دمای پایین باشد.



شکل ۷- اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر روی میزان انرژی شکست پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

براساس نتایج مطالعات پیشین، مواد افزودنی مناسب می‌توانند با ایجاد پیوندهای قوی میان ذرات و بهبود چسبندگی، خواص مکانیکی پلت‌ها را تقویت کنند. همچنین، بر اساس نتایج مطالعات پیشین، مواد افزودنی مناسب می‌تواند با ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات و بهبود چسبندگی، خواص مکانیکی پلت‌ها را ارتقا دهد، از سوی دیگر، افزایش دما باعث تغییرات ساختاری مطلوب در مواد و ارتقای خواص مکانیکی می‌شود (Laei *et al*., 2023a).

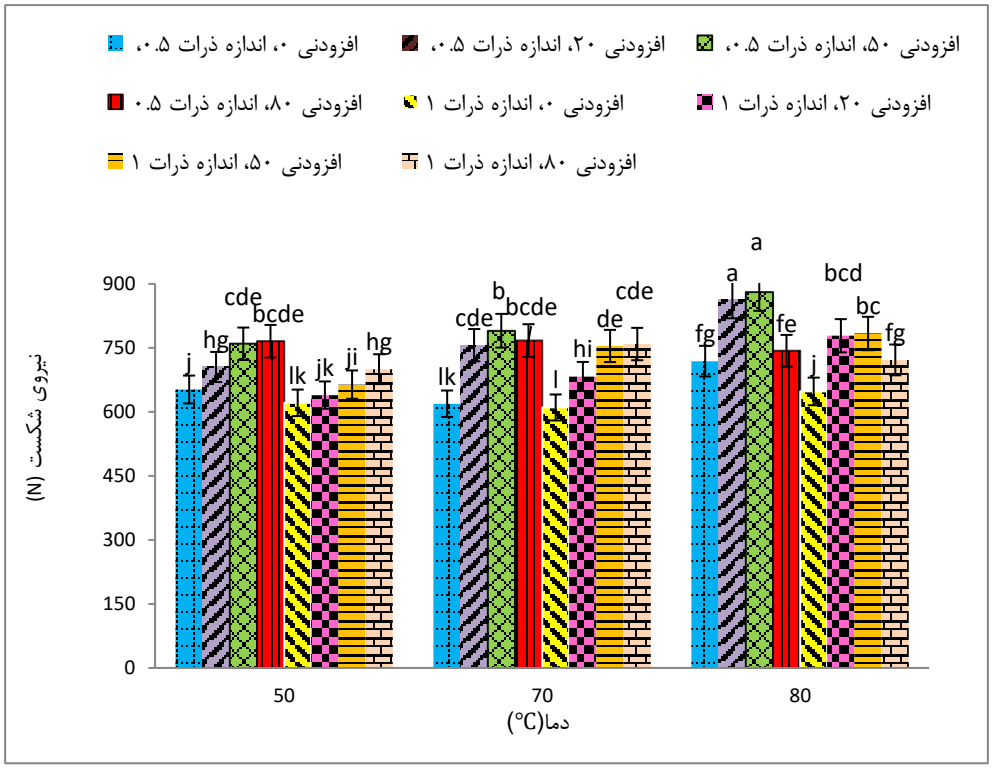
با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب مواد افزودنی مناسب (۲۰-۵۰ درصد)، اندازه ذرات ریزتر (۰/۵ میلی‌متر) و دمای بالاتر (۸۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش قابل توجه میزان انرژی شکست پلت‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت تولید پلت‌ها از ضایعات پوسته سبز پسته می‌شود. این ترکیب از پارامترها می‌تواند به تولید پلت‌های مقاوم‌تر و با کیفیت‌تر منجر شود که از نظر تغذیه دام و فرآیند تولید نیز کارآمدتر می باشند.

میزان نیروی بیشینه شکست پلت‌ها

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان نیروی ماکزیمم شکست نشان داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد بیشترین نیروی بیشینه شکست در ترکیب تیماری ۵۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با ۸۸۰/۸۴۴ نیوتن و کمترین نیروی ماکزیمم شکست در ترکیب تیمار صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۱ میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ۶۱۰/۳۶۱ نیوتن مشاهده شد (شکل ۸).

نتایج نشان داد که استفاده از مواد افزودنی مناسب در ترکیب با اندازه ذرات ریزتر و دمای بالاتر می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی پلت‌ها را بهبود بخشد.

همچنین در صورت عدم استفاده از مواد افزودنی (صفر درصد)، و افزایش اندازه ذرات و دمای پایین می‌تواند باعث کاهش میزان نیروی ماکزیمم شکست شود که دلیل آن عدم وجود مواد افزودنی برای ایجاد پیوندهای مناسب بین ذرات، اندازه ذرات درشت‌تر و عدم تغییرات ساختاری مطلوب تحت دمای پایین باشد.



شکل ۸-اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر روی میزان نیروی ماکزیمم شکست پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

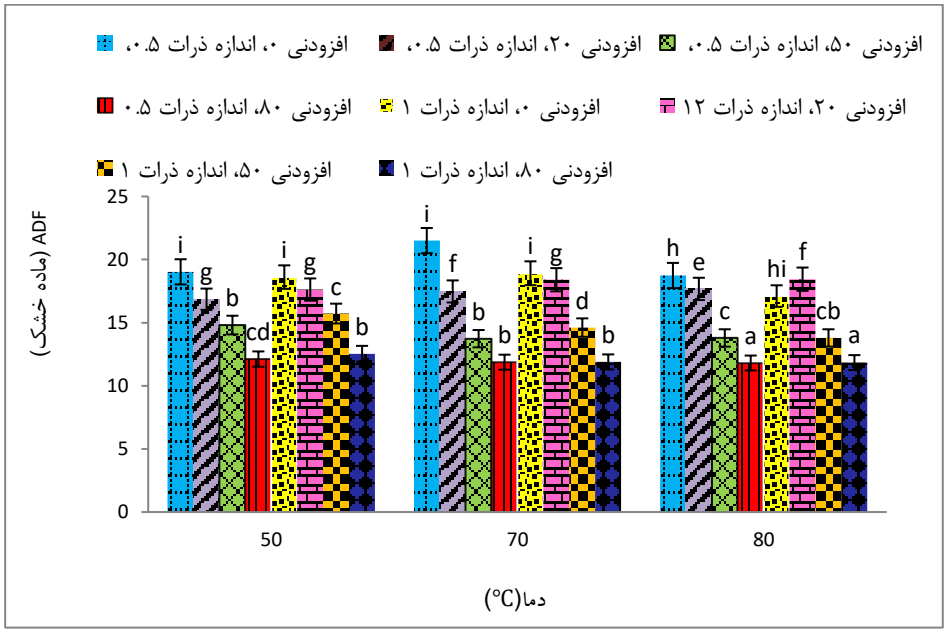
براساس نتایج مطالعات پیشین، مواد افزودنی مناسب می‌توانند با ایجاد پیوندهای قوی میان ذرات و بهبود چسبندگی، خواص مکانیکی پلت‌ها را تقویت کنند. همچنین، بر اساس نتایج مطالعات پیشین، مواد افزودنی مناسب می‌تواند با ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات و بهبود چسبندگی، خواص مکانیکی پلت‌ها را ارتقا دهد، از سوی دیگر، افزایش دما باعث تغییرات ساختاری مطلوب در مواد و ارتقای خواص مکانیکی می‌شود (Laei *et al.*, 2023a).

با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب مواد افزودنی مناسب (۲۰ و ۵۰ درصد)، اندازه ذرات ریزتر (۰/۵ میلی‌متر) و دمای بالاتر (۸۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش قابل توجه در میزان نیروی ماکزیمم شکست پلت‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت تولید پلت‌ها از ضایعات پوسته سبز پسته شد. این ترکیب از پارامترها می‌تواند به تولید پلت‌های مقاوم‌تر و با کیفیت‌تر

منجر شود که از نظر تغذیه دام و فرآیند تولید نیز کارآمدتر می باشند.

میزان چقرمگی شکست پلت‌ها

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان چقرمگی شکست پلت‌ها نشان‌داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما؛ و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد (شکل ۹). بیشترین میزان چقرمگی شکست پلت‌ها در ترکیب تیماری ۵۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با $2.00E^{-14}$ ژول بر متر مکعب بود که این نتایج حاکی از آن است که بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند به ارتقای کیفیت محصول نهایی کمک کند و کمترین میزان چقرمگی شکست پلت‌ها در ترکیب تیمار صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۱ میلی‌متر و دمای ۵۰ درجه سلسیوس با 1.00^{E-14} ژول بر متر مکعب مشاهده شد این کاهش چقرمگی ممکن است ناشی از عدم وجود مواد افزودنی برای ایجاد پیوندهای مناسب، اندازه ذرات بزرگ‌تر و عدم تغییرات مطلوب در ساختار ذرات در دمای پایین باشد.



شکل ۹- اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر روی میزان ADF پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

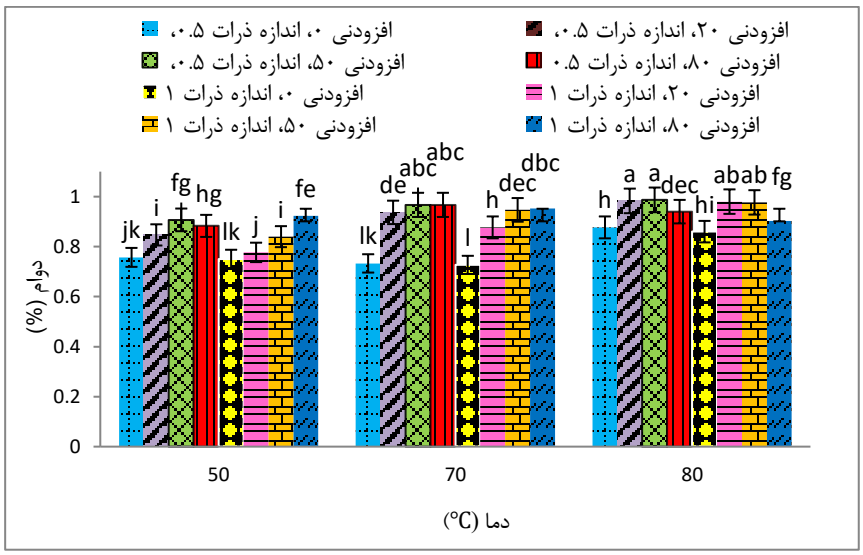
مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که مواد افزودنی مناسب می‌توانند با ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات، چسبندگی بهتری ایجاد کرده و در نتیجه چقرمگی پلت‌ها را افزایش دهند. همچنین، اندازه ذرات ریزتر با افزایش

سطح تماس ذرات، می‌تواند بهبود چقرمگی را به همراه داشته باشد. دمای بالا نیز می‌تواند منجر به تغییرات ساختاری مفیدی در مواد شود که بر چقرمگی اثر مثبت دارد. همچنین گزارش شده استفاده از فشار فشرده‌سازی بالا (۱۱۰۰۰ کیلوپاسکال) و دماهای ۵۰ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب موجب افزایش چگالی، انرژی شکست و چقرمگی پلت‌های تولیدی از ضایعات پوسته سبز پسته می‌شود. بنابراین، پلت‌سازی از ضایعات پوسته سبز پسته یک روش مناسب و مقرون‌به‌صرفه برای تولید خوراک دام است (Laei *et al*., 2023a; laei *et al*., 2023c). این نتایج با نتایج ارائه شده در این پژوهش همخوانی دارد.

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که با کاهش اندازه ذرات، افزایش مواد افزودنی و دما، چقرمگی پلت‌های تولیدی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. این نتایج تأثیر متقابل مواد افزودنی، دما و اندازه ذرات را در ارتقای خواص مکانیکی پلت‌ها تأکید می‌کنند.

میزان دوام پلت‌ها

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان دوام پلت‌ها نشان‌داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی دما و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد (شکل ۱۰). بیشترین میزان دوام پلت‌ها در ترکیب تیماری ۵۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با ۰/۹۸۷درصد و کمترین میزان دوام پلت‌ها در ترکیب تیمار صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات یک میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ۰/۷۲۷ درصد مشاهده شد.



شکل ۱۰- اثر متقابل دما، مواد افزودنی و اندازه ذرات بر روی میزان دوام پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

به‌طور کلی، استفاده از اندازه ذرات ریزتر (۰/۵ میلی‌متر) و مواد افزودنی (۵۰ درصد) منجر به بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام پلت‌ها شده است. احتمالاً این بهبود ناشی از تغییرات ساختاری و فیزیکی در مواد تحت تأثیر دمای بالا، اندازه ذرات ریزتر و مواد افزودنی مناسب است. این تغییرات باعث بهبود چسبندگی و استحکام ذرات و در نتیجه افزایش دوام پلت‌ها می‌شود. طی گزارشی لائی و همکاران (۱۴۰۲) بیان کردند که استفاده از دستگاه پلت ساز با اکسترودر و سیستم کنترل دما می‌تواند کیفیت و چگالی پلت‌های پوسته سبز پسته را بهبود بخشد، نتایج میزان ترکیبات فنولی، تانن، فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی و فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی پلت‌های تولید شده برای دستگاه پلت ساز مجهز به سیستم کنترل دما به ترتیب ۱۰، ۱۹،۱۲ و ۲۶ درصد کمتر از دستکاه پلت‌ساز بدون دخالت سیستم کنترل دما بود.

بطور کلی نشان دادند که استفاده از دستگاه پلت‌ساز مجهز به سیستم کنترل دما در حالی که مواد ضد مغذی موجود در پلت‌های تولید شده را کاهش می‌دهد و باعث افزایش خوش‌خوراکی و هضم‌پذیری آن‌ها می‌شود (Laei *et al*., 2023b). لذا نتایج پژوهش حاضر با نتایج لائی و همکاران هم‌خوانی دارد.

نتایج این مطالعه نشان داد که بهینه‌سازی هم‌زمان دما، اندازه ذرات و مواد افزودنی می‌تواند در بهبود دوام و خواص مکانیکی پلت‌های تولیدی از ضایعات پوسته سبز پسته تأثیرگذار باشد. بنابراین، برای دستیابی به پلت‌های با دوام بیشتر و کیفیت بالاتر، توجه به این عوامل در فرآیند تولید ضروری است.

با توجه به این نتایج، استفاده از این پلت‌ها به‌عنوان خوراک دام می‌تواند نه تنها به تأمین نیازهای غذایی دام‌ها کمک کند بلکه به کاهش هزینه‌های تولید نیز در مناطق پسته‌خیز کشور کمک شایانی نماید.

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما بر خصوصیات مکانیکی وشیمیایی پلت‌های تولیدشده از ضایعات پوسته پسته جهت تغذیه دام.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		لیگنین نامحلول درمواد اسیدی	نامحلول شوینده	تانن	ترکیبات فنلی	دوام	فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی	فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی	چقرمگی	نیروی شکست	انرژی شکست
اندازه ذرات	1	6/18**	0/71**	0/35**	0/009**	23/5**	0/001 ns	8/21E-30**	54115**	0/00004**
مواد افزودنی	3	74/12**	11/8**	52/12**	0/090**	81/9**	181/31**	2/35E-29**	54553**	0/00006**
دما	2	1/87**	1/1**	0/58**	0/064**	22/0**	2/84**	2/54E-29**	38038**	0/00005**
دما*مواد افزودنی	6	1/04**	0/27**	0/06*	0/012**	16/9**	3/43**	1/18E-29**	9108/3**	0/000016**
دما*اندازه ذرات	2	0/42 ns	0/05*	0/001 ns	0/000 ns	3/1**	0/76**	1/18E-30**	2469/9**	0/000002**
مواد افزودنی*اندازه ذرات	3	2/68**	0/30**	0/025 ns	0/002**	6/8**	5/15**	1/18E-30**	2538/4**	0/000001**
مواد افزودنی*دما*اندازه ذرات	6	0/44**	0/08 ns	0/041 ns	0/002**	7/6**	0/50**	8/00E-31**	778/36**	0/000001**
خطای آزمایش	48	0/135	0/013	0/026	0/000	0/06	0/13	9/6e-32	219/57	3/3e-07
ضریب تغییرات		5/47	6/15	4/227	1/68	1/006	2/33	2/287	2/046	2/848

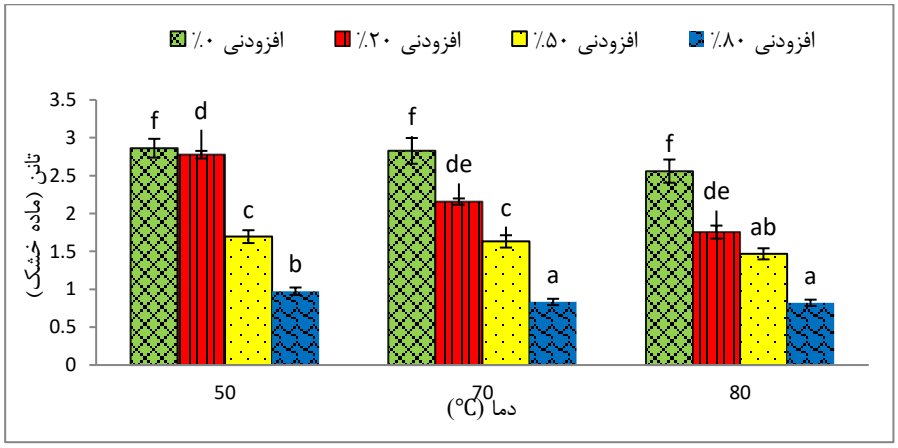
ns،*و ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ %و۱%

اثر متقابل مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر خواص شیمیایی پلت ضایعات پوسته سبز پسته برای تغذیه دام

میزان تانن

نتایج تجزیه واریانس (جدول۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان تانن پلت‌ها نشان‌داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما و اثرات متقابل دوگانه دما×مواد افزودنی؛ مواد افزودنی× اندازه ذرات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند ولی اثر متقابل دوگانه دما× اندازه ذرات در سطح احتمال پ=پنج درصد معنی‌دار بود و اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی بر روی میزان تانن پلت‌ها معنی‌دار نبود.

مقایسه میانگین اثر متقابل دو گانه دما × مواد افزودنی نشان داد کمترین میزان تانن پلت‌ها در ترکیب تیماری با دمای ۸۰ درجه سلسیوس و با ۸۰ درصد مواد افزودنی به میزان ۰/۸۲ درصد و بیشترین میزان تانن پلت‌ها در ترکیب تیماری با دمای ۵۰ درجه سلسیوس و صفر درصد مواد افزودنی به میزان ۲/۸۶ درصد تانن مشاهده شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- اثر متقابل مواد افزودنی و دما بر روی میزان تانن پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

سطح پروتئین خام تغذیه‌ای نشان دهند کیفیت پروتئین‌های خوراک نیست، پروتئین براساس وجود و تعادل اسیدهای آمینه ضروری در مواد تسهیل دهنده خوراک است. ارزش غذایی پروتئین به سطح و در دسترس بودن اسیدهای آمینه ضروری و قابلیت هضم پروتئین بستگی دارد. در بررسی اثر پلت‌سازی بر محتوای پروتئین نمونه‌ها، نتایج محققان نشان می‌دهد که پروتئین‌ها باوجود آب به‌راحتی به گرما پاسخ می‌دهند و این امر ساختار سه‌بعدی و درنتیجه رفتار فیزیکی آن‌ها را تغییر می‌دهد (Rakic, 2013).

فرآوری‌های حرارتی به دلیل تغییراتی که در پیوند کووالانسی ایجاد می‌کنند، به‌طور قابل‌توجهی بر قابلیت هضم پروتئین تأثیرگذارند. فرآیند پلت‌سازی در محدود دمای ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس، منجر به تخریب محدود در پروتئین می‌شود (Tumuluru, 2018) که منجر به تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی پروتئین می-

شود (Liu *et al*., 2004). پروتئین‌ها با منشأ مختلف به دماهای متفاوتی برای تخریب نیاز دارند. دمای تخریب بسته به محتوای آب نمونه‌ها معمولاً حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس است (Rakic, 2013). اسیدهای آمینه ضروری مانند لیزین، متیونین، سیستئین و تریپتوفان به تخریب بسیار حساس هستند. واکنش میلارد بین قندهای احیاء کننده (فروکتوز، گلوکز و پنتوز) و گروه-های آمینه آزاد از اسیدهای آمینه، به‌ویژه لیزین معمولاً در دمای بالا ۱۸۰ درجه سلسیوس و رطوبت کمتر از ۱۵ درصد وزنی اتفاق می‌افتد. تشکیل محصولات میلارد، سودمندی پروتئین و حتی کربوهیدرات‌ها را کاهش می‌دهد. کیفیت جیره به دلیل از بین رفتن اسیدهای آمینه ضروری و کاهش قابلیت هضم کاهش می‌یابد. محصولات واکنش‌های میلارد برای هضم غیرقابل‌دسترس هستند. آنزیم‌های گوارشی قادر به هیدرولیز پیوندهای اسیدآمینه ناشی از این واکنش‌ها نیستند و بنابراین دفع قطعات پپتید در مدفوع اتفاق می‌افتد (Rakic, 2013). با توجه به مطالب مذکور، احتمال انجام واکنش میلارد در نمونه پلت‌های تولیدی کم است و تنها ممکن است تخریب کمی در دما ۸۰ درجه سلسیوس در پروتئین پلت‌های تولیدی اتفاق افتاده باشد.

این یافته‌ها حاکی از آن هستند که با بهینه‌سازی این پارامترها می‌توان به کاهش میزان تانن و بهبود کیفیت پلت‌های تولیدی از ضایعات پوسته سبز پسته دست یافت. به‌طور کلی، این نتایج تأکید می‌کنند که مدیریت دقیق این عوامل می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ویژگی‌های شیمیایی و مکانیکی پلت‌ها را بهبود بخشیده و در نهایت کیفیت آنها را ارتقا دهد.

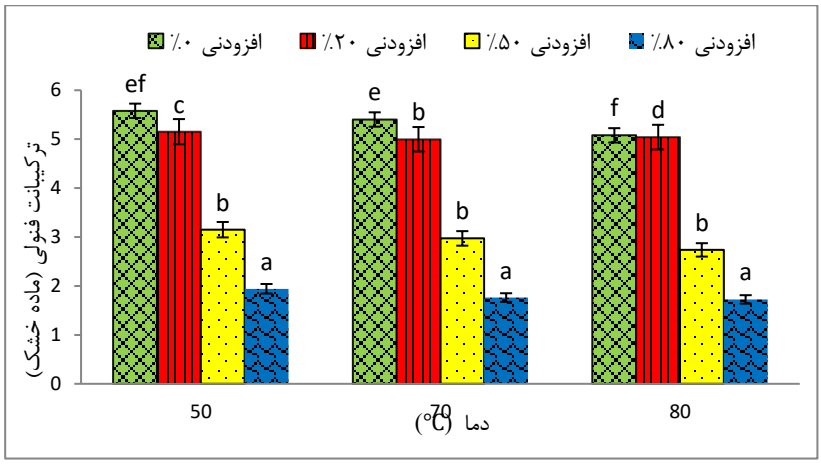
میزان ترکیبات فنولی

نتایج تجزیه واریانس (جدول۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان ترکیبات فنولی پلت‌ها نشان داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما و اثر متقابل دوگانه دما×مواد افزودنی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود ولی اثرات متقابل دیگر معنی‌دار نشدند (شکل ۱۲).

بیشترین میزان ترکیبات فنولی پلت‌ها در ترکیب تیماری صفر درصد مواد افزودنی و دمای ۵۰ درجه سلسیوس با ۵/۸۰ درصد ماده خشک و کمترین میزان ترکیبات فنولی پلت‌ها در ترکیب تیمار ۸۰ درصد مواد افزودنی و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با ۱/۷۲ درصد ماده خشک مشاهده شد (شکل ۱۲). این نتایج نشان می‌دهند که بهینه‌سازی ترکیب این پارامترها می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کیفیت و ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی پلت‌های تولیدشده ایفا کند.

استفاده از حرارت برای پردازش مواد خام، باعث تغییر ترکیب و دسترسی به مواد مغذی و سایر ترکیبات در این مواد می‌شود (Dellavalle *et al.,* 1994). در این فرآیند، نشاسته ژلاتینه و پروتئین‌ها تغییر شکل

می‌دهند و عوامل ضد مغذی از بین می‌روند (Alakangas *et al.*, 2000). پخت با اکسترودر یکی از روش‌های پردازشی مؤثر است که باعث تغییر ساختار نشاسته، پروتئین و بهبود هضم آن توسط آنزیم‌ها می‌شود (Holm & Bjorck., 1988). این نتایج با نتایج حاضر مطابقت داشت. در پژوهش حاضر بیشترین کاهش میزان ترکیبات فنولی و تانن پلت‌های تولیدشده از ضایعات پوسته سبز پسته با سطوح مختلف در جیره دام در تیمار دما ۸۰ درجه سلسیوس و مواد افزودنی ۸۰ درصد به میزان ۷۹ و ۸۱ درصد کاهش در مقایسه با پوسته سبز پسته فرآوری نشده (پلت نشده) را داشت. کاهش میزان ترکیبات فنولی و تانن در اثر مواد افزودنی، دما و اکسترودر با نتایج برخی از آزمایش‌ها گذشته هماهنگ است (Rojas *et al.*, 2016; laei *et al.*, 2023b). همچنین در تیمار با دما ۸۰ درجه سلسیوس و بدون افزودن مواد افزودنی (صفر ٪)، ترکیبات فنولی و تانن به میزان ۴۲ و ۴۳ درصد کاهش در مقایسه با پوسته سبز پسته فرآوری نشده (پلت نشده) را داشت. که این امر ممکن است به دلیل وجود اکسترودر، دما و مواد افزودنی از عوامل موثر در تخریبی ترکیبات فنولی و تانن با دستگاه پلت‌ساز باشد. به دلیل ژلاتینه شدن نشاسته، تخریب مواد ضد مغذی حساس به حرارت، تخریب دیواره‌های سلولی و (یا) بهبود دسترسی به مواد مغذی نسبت داده می‌شود (Silversides & Bedford., 1999). در گزارش مشابه آمده است، خشک‌کردن برگ‌های علوفه کالیاندرا به‌وسیله حرارت بالا باعث کاهش تانن متراکم آزاد به میزان ۲۱ درصد شد. (Perez Maldonado (and Norton., 1996. این نتایج با یافته‌های میزان تانن پلت‌های تولیدی درنتیجه پژوهشی حاضر همخوانی دارد.



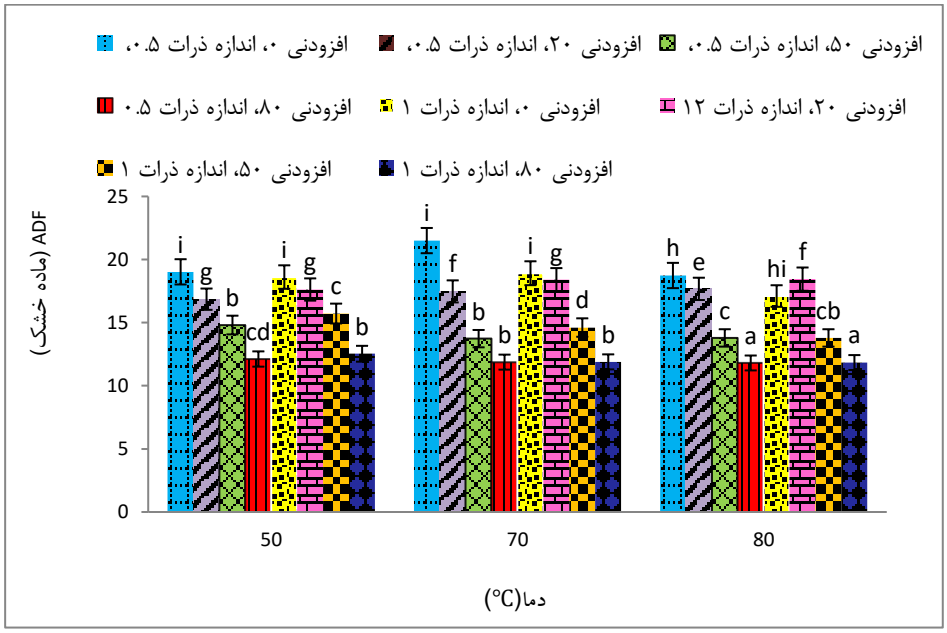
شکل ۱۲- اثر متقابل مواد افزودنی و دما بر روی میزان ترکیبات فنولی پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

میزان فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها

تجزیه واریانس (جدول۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی

پلت‌ها نشان‌داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد بیشترین میزان فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها در ترکیب تیماری صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۱ میلی‌متر و دمای ۵۰ درجه سلسیوس با ۹/۳۵۷ درصد ماده خشک و کمترین میزان فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها در ترکیب تیمار ۸۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ۴/۱۷ درصد ماده خشک مشاهده شد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که برای بهینه‌سازی کیفیت پلت‌ها، ترکیب مناسب مواد افزودنی (۸۰ درصد)، دمای بالا (۸۰ درجه سلسیوس) و اندازه ذرات متوسط تا ریز (۰/۵ تا ۱ میلی‌متر) باید در نظر گرفته شود (شکل ۱۳).

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از فناوری مناسب و کنترل دقیق پارامترهای فرآیند، می‌توان ضایعات پوسته سبز پسته را به محصولی با کیفیت مطلوب تبدیل کرد. همچنین، استفاده از این پلت‌ها به عنوان خوراک دام می‌تواند به تأمین نیازهای غذایی دام‌ها و کاهش هزینه‌های تولید در مناطق پسته‌خیز کشور کمک شایانی نماید.

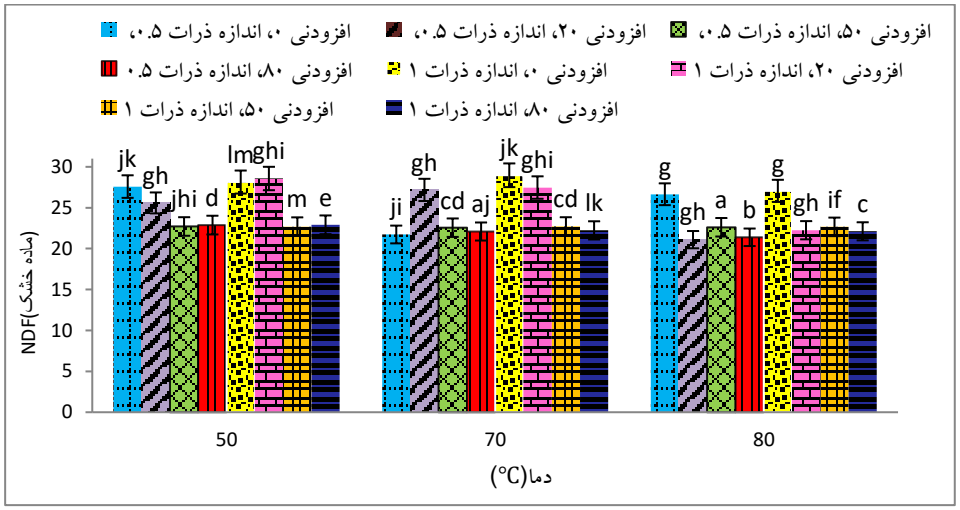


شکل ۱۳- اثر متقابل اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما بر روی میزان ADF پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام

میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی پلت‌ها

تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی پلت‌ها نشان‌داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× اندازه ذرات × مواد افزودنی نشان داد

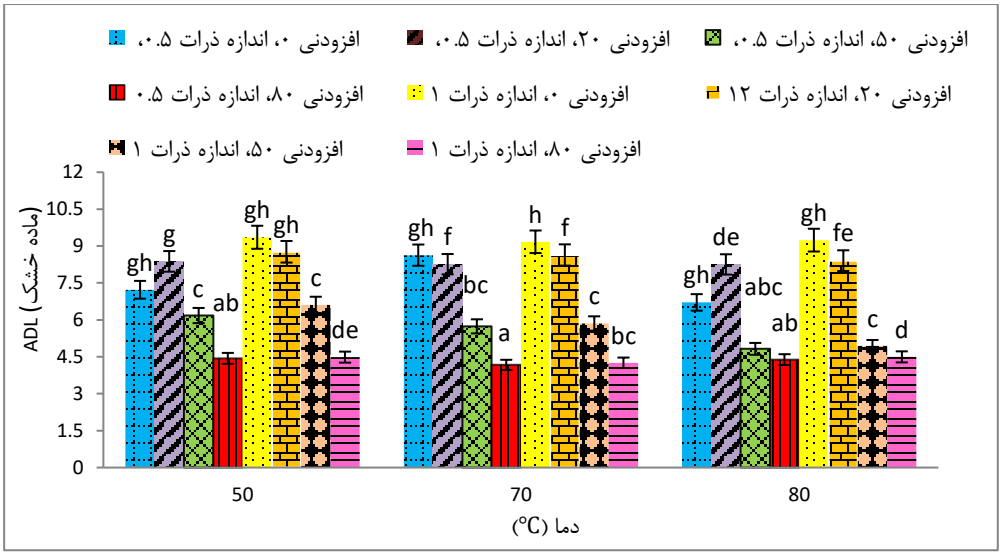
بیشترین میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی پلت‌ها در ترکیب تیماری صفر درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات یک میلی‌متر و دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ۲۸/۹۰ درصد ماده خشک و کمترین میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی پلت‌ها در ترکیب تیمار ۲۰ درصد مواد افزودنی، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۸۰ درجه سلسیوس با ۲۱/۱۰ درصد واحد ماده خشک مشاهده شد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- اثر متقابل اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما بر روی میزان NDF پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها

تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر مواد افزودنی، اندازه ذرات و دما بر میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها نشان داد اثر اصلی اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما؛ و برهمکنش‌های دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. ولی اثر متقابل دوگانه دما× اندازه ذرات معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه دما× مواد افزودنی× اندازه ذرات نشان داد. بیشترین میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها در ترکیب تیماری دمای ۷۰ درجه سلسیوس، مواد افزودنی صفر و اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر با ۲۱/۵۰ درصد ماده خشک و کمترین میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی پلت‌ها در ترکیب تیمار دمای ۸۰ درجه سلسیوس و اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر با ۱۱/۸۰درصد ماده خشک مشاهده شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- اثر متقابل اندازه ذرات، مواد افزودنی و دما بر روی میزان ADL پلت‌های تولیدشده از پوسته سبز پسته در جیره دام.

مطابق با نتایج پژوهش‌های محققان، کاه غنی شده با اوره سبب کاهش میزان فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی و فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی به دلیل شکسته شدن دیواره سلولی و برهم خوردن ترکیبات ساختمانی کاه می‌شود (Gebrertsadik & Kebede, 2011). از طرفی تجزیه لیگنین و شکست اتصالات عرضی توسط ازن گزارش شده است که با کاهش قدرت چسبندگی بین میکروالیاف‌های سلولز، افزایش محلولیت لیگنین و همی سلولز منجر به آزاد شدن سلولز می‌شود که دسترسی آنزیم‌ها به سلولز و همی سلولز را بهبود می‌بخشد (Barros *et al.*, 2013). کاهش معنی‌دار و قابل ملاحظه در مقدار لیگنین در نمونه‌های حاوی ازن به همراه کاهش pH، حاکی از هیدرولیز گسترده اجزای دیواره سلولی، شکسته شدن پیوند میان سلولز و لیگنین، آزاد شدن همی سلولز و تبدیل آن به اسیدهای آلی و قندهای محلول است که کاهش بخش‌های الیافی را توجیه می‌کند. این یافته‌ها حاکی از آن هستند که با بهینه‌سازی این پارامترها می‌توان به کاهش میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی و بهبود کیفیت پلت‌های تولیدی از ضایعات پوسته سبز پسته دست یافت. به‌طور کلی، این نتایج تأکید می‌کنند که مدیریت دقیق این عوامل می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ویژگی‌های شیمیایی و مکانیکی پلت‌ها را بهبود بخشیده و در نهایت کیفیت آنها را ارتقا دهد. علاوه بر این، برای میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی در تیمار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس و مواد افزودنی ۸۰ درصد و اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر نتایج مطلوبی به دست آمد، به‌طوری‌که برای میزان لیگنین نامحلول مواد شوینده اسیدی، فیبر نامحلول مواد شوینده اسیدی و فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی به‌ترتیب ۵۸، ۵۰، و ۳۰ درصد کاهش نسبت به پوسته سبز پسته فرآوری نشده (پلت نشده) مشاهده شد.

ضریب تغییرات (CV)

مقدار خطای آزمایش در تمام خصوصیات کوچک بود که نشان‌دهنده دقت مناسب در اندازه‌گیری‌ها است. این موضوع به معنی قابل اعتماد بودن نتایج است و بیانگر کنترل دقیق شرایط آزمایش است. ضریب تغییرات (CV) نشان‌دهنده میزان تغییرات نسبی در داده‌ها است. برای همه خصوصیات مورد بررسی، میزان ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۱۰ بود که نشان‌دهنده دقت بالای آزمایش و کنترل بیشتر در این شرایط آزمایش است.

ضریب همبستگی بین خصوصیات مکانیکی و شیمیایی تولید پلت از ضایعات پوسته سبز پسته در تغذیه

نتایج ضریب همبستگی (جدول ۲) نشان داد که بین میزان ترکیبات فنولی و تانن (r=0/91**)، میزان لیگنین نامحلول در مواد شوینده اسیدی (r=0/95**)، میزان فیبر نامحلول در مواد شوینده اسیدی (r=0/95**) و میزان فیبر نامحلول در مواد شوینده خنثی (r=0/68**) رابطه‌ای مثبت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار وجود دارد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش ترکیبات فنولی، سایر ترکیبات شیمیایی مذکور نیز افزایش می‌یابند و برعکس. بنابراین، در فرآیند تولید پلت باید به میزان ترکیبات فنولی توجه ویژه‌ای شود، زیرا افزایش بیش از حد آن‌ها می‌تواند موجب کاهش کیفیت پلت گردد.

همچنین همبستگی بین ترکیبات فنولی با دوام پلت (r=-0.59**)، انرژی شکست (r=-0/47**)، نیروی شکست (r=-0/48**) و چقرمگی (r=-0/42**) منفی و در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش ترکیبات فنولی سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی پلت‌ها و در نتیجه افزایش کیفیت آن‌ها می‌شود.

علاوه بر این، بین چقرمگی با دوام (r=0/82**)، انرژی شکست (r=0/95**) و نیروی شکست (r=0/89**) نیز رابطه مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد مشاهده گردید که بیانگر هم‌راستایی این متغیرها با یکدیگر است.

همبستگی مثبت و قوی بین میزان فیبر نامحلول در مواد شوینده خنثی، فیبر نامحلول در مواد شوینده اسیدی و لیگنین نامحلول در مواد شوینده اسیدی نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها به صورت متقابل در تعیین پایداری و ساختار پلت‌ها نقش دارند. به‌ویژه، افزایش میزان فیبر و لیگنین نامحلول در مواد شوینده اسیدی می‌تواند به کاهش دوام و مقاومت مکانیکی پلت‌ها منجر شود.

به طور کلی، دوام پلت‌ها با اغلب ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی رابطه‌ای منفی و قوی دارد،

به‌طوری که افزایش دوام معمولاً با کاهش ترکیبات فنولی، تانن، فیبر نامحلول (در شوینده‌های خنثی و اسیدی) و لیگنین نامحلول همراه است. در فرآیند پلت‌سازی، تحت دما و فشار بالا، ساختار سلولی زیست‌توده شکسته شده و لیگنین از دیواره سلولی آزاد می‌شود. افزودنی‌ها و چسب‌ها با پر کردن فواصل بین ذرات و ایجاد پیوندهای جامد پس از سرد شدن، سبب افزایش استحکام پلت می‌شوند (Stelte *et al.,* 2012). پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند که جریان لیگنین در دما و فشار بالا، پل‌های جامدی بین ذرات پس از فشرده‌سازی و خنک شدن ایجاد می‌کند (Kaliyan & Morey, 2009). بنابراین، برای دستیابی به پلت‌های مقاوم و بادوام، لازم است ترکیب مواد اولیه و شرایط فرآیند به گونه‌ای تنظیم شود که پیوندهای بین ذرات و مقاومت مکانیکی پلت‌ها بهینه گردد.

همچنین، همبستگی مثبت و قوی بین ویژگی‌های مکانیکی پلت (انرژی شکست، نیروی شکست و چقرمگی) نشان داد که پلت‌هایی که در برابر شکست مقاوم‌تر هستند، معمولاً از نظر استحکام و انعطاف‌پذیری نیز عملکرد بهتری دارند.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که ترکیبات فنولی و تانن از عوامل کلیدی در کاهش دوام و ویژگی‌های مکانیکی پلت‌ها هستند. از آنجا که این ترکیبات با فیبرهای ساختاری (مانند لیگنین و فیبر نامحلول) همبستگی مثبت دارند، افزایش بیش از حد آن‌ها ممکن است موجب افت کیفیت پلت گردد.

در فرآیند فشرده‌سازی، دما و فشار بالا سبب بخار شدن رطوبت موجود در زیست‌توده و وقوع واکنش‌های هیدرولیز، ژلاتینه شدن نشاسته و تخریب پروتئین می‌شود. این فرایندها منجر به تشکیل کمپلکس‌های نشاسته–پروتئین و افزایش خاصیت چسبندگی مواد می‌گردند. علاوه بر این، ذوب موم‌های سطحی در دماهای بالا می‌تواند به عنوان چسب طبیعی بین الیاف عمل کند (Stelte *et al.*, 2011a). هرچند برخی مطالعات دیگر، اثر منفی موم‌های گیاهی را به دلیل ایجاد لایه‌های مرزی ضعیف گزارش کرده‌اند (Stelte *et al.*, 2012).

Tumuluru *et al* (۲۰۱۱) و Tumuluru (۲۰۲۱) نیز بیان کردند که افزایش دما و فشار در طی فرآیند تراکم موجب شکل‌گیری انواع پیوندهای فیزیکی و شیمیایی (از جمله پل‌های جامد، نیروهای سطحی و الکترواستاتیکی و درهم‌تنیدگی مکانیکی ذرات) می‌شود که استحکام پلت‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش نیز با یافته‌های مذکور درباره ارتباط بین خواص مکانیکی و دوام پلت‌ها همخوانی دارد و نشان می‌دهد تنظیم بهینه ترکیب مواد و شرایط فرآیند برای تولید پلت‌های باکیفیت و مقاوم در تغذیه دام ضروری است.

جدول ۲- ضریب همبستگی تاثیر دما *مواد افزودنی و اندازه ذرات بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی تولید پلت از ضایعات پوسته سبز پسته در تغذیه دام

متغییر	ترکیبات فنلی	تانن	لیگنین نامحلول در شوینده اسیدی	فیبر نامحلول در شوینده اسیدی	فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی	دوام	انرژی شکست	نیروی شکست	چقرمگی
ترکیبات فنلی	1/00								
تانن	0/91**	1/00							
لیگنین نامحلول در شوینده اسیدی	0/95**	0/89**	1/00						
فیبر نامحلول در شوینده اسیدی	0/95**	0/85**	0/89**	1/00					
فیبر نامحلول مواد شوینده خنثی	0/68**	0/78**	0/66**	0/58**	1/00				
دوام	-0/59**	-0/72**	-0/58**	-0/62**	-0/64**	1/00			
انرژی شکست	-0/47**	-0/63**	-0/49**	-0/50**	-0/60**	0/90**	1/00		
نیروی شکست	-0/48**	-0/63**	-0/52**	-0/50**	-0/62**	0/88**	0/95**	1/00	
چقرمگی	-0/42**	-0/59**	-0/45**	-0/44**	-0/58**	0/83**	0/95**	0/89**	1/00

ns،*و ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که سه عامل کلیدی شامل اندازه ذرات، نوع و میزان مواد افزودنی، و دمای فرآیند پلت‌سازی تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلت‌های تولیدی از پوست سبز پسته دارند. تحلیل نتایج با استفاده از مدل رگرسیونی نشان داد که کاهش اندازه ذرات تا حد ۰/۵ میلی‌متر و تنظیم دمای فرآیند در بازه‌ی بهینه، موجب افزایش دوام، چقرمگی و نیروی شکست پلت‌ها شد. در عین حال، کنترل دقیق دما و ترکیب مواد افزودنی منجر به کاهش معنی‌دار ترکیبات ضدتغذیه‌ای از جمله تانن و لیگنین گردید. نقاط بهینه با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ تعیین شدند و بیانگر آن بودند که تعادل میان خواص مکانیکی و کیفیت تغذیه‌ای، نه بیشینه‌سازی صرف یک ویژگی، عامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی است. یافته‌های این مطالعه، علاوه بر تأیید فرضیه مبنی بر امکان بهبود کیفیت پلت با تنظیم هم‌زمان سه پارامتر فنی، گامی نو در جهت ارتقای بهره‌وری ضایعات کشاورزی و جایگزینی آن‌ها در خوراک دام به شمار می‌رود.

از منظر زیست‌محیطی، این فرآیند با کاهش سوزاندن یا دفن ضایعات پسته، صرفه‌جویی در انرژی و کاهش وابستگی به واردات خوراک، به توسعه‌ی پایدار و کاهش اثرات کربنی تولید خوراک دام کمک می‌کند. بنابراین، یافته‌های حاصل می‌توانند مبنای طراحی صنعتی فرآیند پلت‌سازی ضایعات کشاورزی در مقیاس وسیع قرار گیرند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود:

انجام تحقیقات بیشتر برای بررسی تأثیرات بلندمدت مصرف پلت‌های تولیدشده از این ضایعات بر سلامت دام و کیفیت محصولات دامی توصیه می‌شود.

سرمایه‌گذاری در توسعه فناوری‌های جدید برای بهبود فرآیند پلت‌سازی و کاهش هزینه‌های تولید می‌تواند به افزایش رقابت‌پذیری این محصولات در بازار کمک کند.

با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت ضایعات کشاورزی و تأثیر آن بر امنیت غذایی و محیط‌زیست، این پیشنهادات می‌توانند به‌عنوان راهکارهای مؤثر در بهبود کیفیت خوراک دام و کاهش هزینه‌ها در صنعت دام‌پروری مورد استفاده قرار گیرند.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارایه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

سپاسگزاری

به این وسیله از سازمان بسیج جامعه کشاورزی و همکاری دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)،

دانشگاه تهران در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گرد

منابع

۱. فروغ عامری، نادر. (۱۳۷۶). تعیین ارزش غذایی و قابلیت هضم پوسته نرم پسته خشک و سیلو شده. پایان نامه کارشناسی ارشد علوم دامی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. گل محمدی فرهود و رضوی، سید حمید، (۱۳۹۱). نگاهی به راهکارها و مزایای تولید خوراک دام از پوسته تازه پسته. اولین همایش ملی کشاورزی در شرایط دشوار محیطی، رامهرمز.

۳. فضایلی، حسن. (۱۳۸۶). ارزش غذایی بقایای خشک پسته همراه با یونجه خشک در تغذیه گوسفند. مجموعه مقالات دومین کنگره ملی علوم دامی و آبزیان، موسسه تحقیقات علوم دامی کشور. کرج، ۱۳۷-۱۳۱.

۴. لائی، کاظم، حاجی آقا علیزاده، حسین و کیانمهر، محمد حسین. (۱۴۰۲). بررسی استفاده از دو دستگاه پلت‌زن صنعتی و طراحی شده بر قابلیت تولید پلت بقایای پوسته سبز پسته و ترکیبات ضدمغذی آن. تولیدات دامی، ۲۵(۳)، ۳۴۳-۳۵۶.

1. American Association of Cereal Chemists. Approved Methods Committee. (2000). Approved methods of the American association of cereal chemists (Vol. 1). *American Association of Cereal Chemists.*
2. Alakangas, E., & Paju, P. (2002). Wood pellets in Finland.
3. Standard, A. S. A. B. E. (2002). Cubes, Pellets, and Crumbles-Definitions and Methods for Determining Density, Durability, and Moisture Content. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*
4. ASABE, A. (2006). ASAE S319. 3—method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving, ASABE Standards, 602–605, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
5. Attar, A., Kermanshahi, H., & Golian, A. (2018). Effects of conditioning time and sodium bentonite on pellet quality, growth performance, intestinal morphology and nutrient retention in finisher broilers. *British poultry science, 59(2), 190-197.*
6. de Barros, R. D. R. O., de Sousa Paredes, R., Endo, T., da Silva Bon, E. P., & Lee, S. H. (2013). Association of wet disk milling and ozonolysis as pretreatment for enzymatic saccharification of sugarcane bagasse and straw. *Bioresource technology, 136, 288-294.*
7. Blakely, R. M., Jowsey, J. R., & MacGregor, H. I. (1955). The effect of sodium bentonite in the diets of turkey poults. *In Poultry Science*, *34*(5), 1181-1181).
8. Valle, G. D., Quillien, L., & Gueguen, J. (1994). Relationships between processing conditions and starch and protein modifications during extrusion-cooking of pea flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 64(4), 509-517.*

9. Dou, Z., Toth, J. D., & Westendorf, M. L. (2018). Food waste for livestock feeding: Feasibility, safety, and sustainability implications. *Global food security, 17,* 154-161.
10. Franklin, S. T., Amaral-Phillips, D. M., Jackson, J. A., & Campbell, A. A. (2003). Health and performance of Holstein calves that suckled or were hand-fed colostrum and were fed one of three physical forms of starter. *Journal of Dairy Science, 86*(6), 2145-2153.
11. Gebretsadik, G., & Kebede, K. (2011). Feed utilization, digestibility and carcass parameters of Tigray highland sheep fed urea treated wheat straw supplemented with mixtures of wheat bran and noug seed cake. *Livestock Research for Rural Development, 23(9).*
12. Holm, J., & Björck, I. (1988). Effects of thermal processing of wheat on starch: II. Enzymic availability. *Journal of Cereal Science, 8*(3), 261-268.
13. Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Densification characteristics of corn stover and switchgrass. *Transactions of the ASABE, 52(3), 907-920.*
14. Kazemi, M., Valizadeh, R., & Salem, A. Z. M. (2024). Dietary inclusion of pistachio wastes (Pistacia vera L.) to fattening male goat kids' feeding: Chemical-mineral compositions, in vitro ruminal fermentation, in vivo digestibility, hemato-biochemical profile, and growth performance. *Small Ruminant Research, 235*, 107274.
15. Kuepper, B., & Stravens, M. (2022). Mapping the European soy supply chain. Profundo, *Commissioned by WWF European Policy Office: Amsterdam, The Netherlands.*
16. Laei, K., Haji Agha Alizadeh, H., & Kianmehr, M. H. (2023). The Effects of Moisture Content, Temperature, and Compaction Pressure on the Compressibility of Animal Feed Pellets Produced From Green Pistachio Shell Residues. *Journal of Nuts, 14*(2), 113-128.
17. Laei, K., Haji Agha Alizadeh, H., & Kianmehr, M. H. (2023c). Design and Evaluating a Hydraulic Pelletizing Machine for Producing Feed Pellets from Pistachio Shells. *Biomechanism and Bioenergy Research, 2*(2), 112-129.
18. Laei, K., Kianmehr, M. H., & Laei, GH. (2024b). Pellet Production from Green Pistachio Shell Waste with Varying Levels in Livestock Feed. *Biomechanism and Bioenergy Research, 3*(2), 131.
19. Makkar, H. P. S., and B. Singh. (1993). Effect of storage and urea addition on detannification and in sacco dry matter digestibility of mature oak (Quercus incana) leaves. *Anim. Feed Sci. Technol. 41*, 247–259.
20. Martin, L. C., Clifford, A. J., & Tillman, A. D. (1969). Studies on sodium bentonite in ruminant diets containing urea. *Journal of Animal Science, 29*(5), 777-782.
21. McMahon, L. R., Majak, W., McAllister, T. A., Hall, J. W., Jones, G. A., Popp, J. D., & Cheng, K. J. (1999). Effect of sainfoin on in vitro digestion of fresh alfalfa and bloat in steers.

Canadian Journal of Animal Science, 79(2), 203-212.

22. Perez-Maldonado, R. A., & Norton, B. W. (1996). The effects of condensed tannins from Desmodium intortum and Calliandra calothyrsus on protein and carbohydrate digestion in sheep and goats. *British Journal of Nutrition, 76*(4), 515-533.
23. Pinotti, L., Ferrari, L., Fumagalli, F., Luciano, A., Manoni, M., Mazzoleni, S., ... & Tretola, M. (2023). Pig-based bioconversion: the use of former food products to keep nutrients in the food chain. *animal, 17*, 100918.
24. Pour, A.R.A., Kermanshahi, H. and Golian, A. (2021). Effects of conditioning time and activated sodium bentonite on pellet quality, performance, intestinal morphology, and nutrients retention in growing broilers fed wheat-soybean meal diets. *Animal Feed Science and Technology, 277*, 114955.
25. Rakic, L. (2013). Feed Structure: Effects on pHysical quality of the feed, chemical status of the feed and nutritional consequence. *Norwegian University of Life Science.*
26. Rojas, O. J., Vinyeta, E., & Stein, H. H. (2016). Effects of pelleting, extrusion, or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *Journal of animal science, 94*(5), 1951-1960.
27. Salemdeeb, R., Zu Ermgassen, E. K., Kim, M. H., Balmford, A., & Al-Tabbaa, A. (2017). Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options. *Journal of cleaner production, 140*, 871-880.
28. Salihoglu G, Salihoglu NK, Ucaroglu S, Banar M (2018) Food loss and waste management in Turkey. *Bioresource Technology. 248*, 88-99.
29. Silversides, F. G., Bedford, M. R. 1999. Effect of pelleting temperature on the recovery and efficacy of a xylanase enzyme in wheat-based diets. *Poultry science, 78*(8), 1184-1190.
30. Sogunle, O. M., Olatoye, B. B., Egbeyale, L. T., Jegede, A. V., Adeyemi, O. A., Ekunseitan, D. A., & Bello, K. O. (2013). Feed forms of different particle sizes: Effects on growth performance, carcass characteristics, and intestinal villus morphology of cockerel chickens. *Pacific Journal of Science and Technology 14*, 405-415.
31. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., Sanadi, A.R. (2012). Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties. *BioEnergy Research*, *5*, 450–458.
32. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., Sanadi, A.R. (2012).Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties. *BioEnergy Research*, *5*, 450–458.

33. Sultana, S., Ginting, S. P., Wiryawan, K. G., & Wina, E. (2021). Meta-analysis of the effects of urea supplementation on rumen fermentation and sheep performance. *Veterinary World, 14*(6), 1478–1488.
34. Tumuluru, J. S. (2021). Biomass densification: Systems, particle binding, process conditions, quality attributes, conversion performance, and international standards. *Springer Nature.*
35. 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.
36. Liu, Z. S., Chang, S. K., Li, L. T., & Tatsumi, E. (2004). Effect of selective thermal denaturation of soybean proteins on soymilk viscosity and tofu's physical properties. *Food research international, 37*(8), 815-822.

Investigation of the Interactive Effects of Particle Size, Additives, and Temperature on the Mechanical and Chemical Properties of Pellets Produced from Pistachio Green Hull Waste for Animal Feed

Kazem Laei[8], Mohammad Hossein Kianmehr[9], Ghanbar Laei[10*]

Abstract

Pistachio green hull, an underutilized agricultural by-product with high potential, is often neglected in many regions. This study aimed to investigate the interactive effects of additives, particle size, and temperature on the mechanical and chemical properties of pellets produced from pistachio green hull waste for animal feed. The analysis of variance showed that temperature, additives, and particle size each had significant independent effects on pellet durability, maximum breaking force, fracture energy, and toughness. The most pronounced improvements in durability, maximum breaking force, fracture energy, and toughness were observed in the treatment with 50% additive level, a conditioning temperature of 80 °C, and a particle size of 0.5 mm. Pellets produced at 80°C with 80% additives exhibited the largest reductions in phenolic compounds and tannin content-79% and 81%, respectively, compared with unpelleted pistachio green hull. Additionally, the optimal treatment (70°C, 80% additives, 0.5 mm particle size) resulted in substantial decreases in acid detergent lignin (58%), acid detergent fiber (50%), and neutral detergent fiber (30%) relative to the unprocessed (unpelleted) hull. These findings indicate that optimizing particle size, additive level, and processing temperature not only enhances the mechanical performance of the pellets but also significantly reduces antinutritional factors, thereby producing a more cost effective and sustainable animal feed from agricultural waste.

Keywords: Pistachio green shell waste, quantitative and qualitative properties of pellets, animal feed.

[8] PhD graduate, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bo Ali Sina University, Hamadan.

[9] Department Agricultural Technical, Aburihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

[10] Correspoding Author, Department of Agriculture. Strategic crop and Horticulture Center. Da.C, Islamic Azad University. Damghan, Iran.

* Corresponding author: Laey1356@gmail.com : GH.LAEI@iau.ac.ir.