تولیدات دامی
دوره ۱۸ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۳۹۵
صفحه‌های ۲۴۸-۲۳۵

# تأثیرات عمل‌آوری با پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر فراسنجه‌های تولید گاز و گوارش‌پذیری کاه سویا

آیناز اصلانیان[۱]*، فرزاد قنبری[۲]، جواد بیات‌کوهسار[۲]، بهروز کریمی‌شهرکی[۳]

۱. کارشناس ارشد گروه علوم دامی، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران
۲. استادیار گروه علوم دامی، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران
۳. کارشناس، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، کرج، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۰۷

## چکیده

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری)، هیدروکسید سدیم (۵۰ گرم در کیلوگرم) و اکسید کلسیم (۱۶۰ گرم در کیلوگرم) بر فراسنجه‌های تولید گاز و گوارش‌پذیری کاه سویا در شرایط برون‌تنی انجام شد. تمامی تیمارها، به‌جز پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری)، تا چهار ساعت بعد از انکوباسیون تولید گاز نداشتند و دارای فاز تأخیر بودند. از زمان هشت ساعت انکوباسیون تا ۹۶ ساعت، بیش‌ترین تولید گاز در تیمارهای هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد (P<۰/۰۵). عمل‌آوری تأثیری بر نرخ تولد گاز نداشت، اما پتانسیل تولید گاز (**b**) را افزایش داد (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار بخش **b** مربوط به تیمارهای هیدروکسید سدیم + پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) بود. گوارش‌پذیری مادهٔ آلی، انرژی قابل متابولیسم، انرژی خالص و اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر تحت‌تأثیر عمل‌آوری افزایش یافتند (P<۰/۰۵). بیشترین افزایش در تیمارهای هیدروکسید سدیم + پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد. گوارش‌پذیری برون‌تنی مادهٔ خشک و مادهٔ آلی توسط پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و استفادهٔ توأم از آن‌ها افزایش یافت (**P<۰/۰۵**)، اما اکسید کلسیم بر این صفات معنی‌دار نبود. به‌جز سطوح ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری پرتو گاما، سایر تیمارها باعث کاهش نیتروژن آمونیاکی شدند (P<۰/۰۵). تولید تودهٔ میکروبی در پایان ۲۴ ساعت انکوباسیون، توسط تیمارهای اکسید کلسیم و اکسید کلسیم + پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) کاهش یافت (P<۰/۰۵). براساس نتایج پژوهش حاضر، ارزش تغذیه‌ای کاه سویا با تیمارهای پرتو گاما و هیدروکسید سدیم افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** اکسید کلسیم، پرتو گاما، تولید گاز، کاه سویا، گوارش‌پذیری، هیدروکسید سدیم.

* نویسنده مسئول
Email: aynaz_aslaniyan67@yahoo.com

## مقدمه

امروزه تأمین احتیاجات غذایی دام باتوجه به فقر کمی و کیفی مراتع و تأمین‌نبودن علوفهٔ کافی و نیز بالارفتن هزینهٔ تولید، از چالش‌های اساسی در دامپروری است. در این زمینه، استفاده از محصولات فرعی زراعی، باتوجه به حجم وسیع تولید آن‌ها، بر کاهش آلودگی محیط زیست کمک کرده است و در برطرف‌کردن بخشی از نیازهای غذایی دام‌ها نیز می‌تواند راهگشا باشد [۲].

کاه ها به‌عنوان محصولات فرعی زراعت غلات، حبوبات، و ضایعات حاصل از صنایع چوب، مهم‌ترین ترکیبات لیگنوسلولزی‌اند که در دستهٔ مواد خوراکی غیرمعمول در جیرهٔ غذایی دام‌ها قرار دارند. با گوارش‌پذیری محصولات فرعی زراعی توسط بلورهای سلولز، پیوند بین کربوهیدرات‌های ساختمانی و لیگنین و همچنین وجود گروه استیل در همی‌سلولز محدود شده است [۷]. ارزش انرژی‌زایی کاه‌ها را می‌توان با انجام عمل‌آوری مناسب بهبود بخشید [۱۴].

گیاه سویا در بیشتر مناطق دنیا و ایران برای به‌دست‌آوردن روغن آن کشت می‌شود. کاه سویا پس‌ماندهٔ زراعی با کربوهیدرات‌های ساختمانی و لیگنین بالاست که الیاف نامحلول در شویندهٔ خنثی در آن بین ۵۸ تا ۷۰درصد گزارش شده است [۱۹]. این ترکیبات باعث کاهش میزان مصرف و گوارش پذیری خوراک می‌شوند. عمل‌آوری شیمیایی مواد لیگنوسلولزی، با بازکردن ساختار تودهٔ زیستی و افزایش تخلخل آن و همچنین کاهش ساختار بلوری سلولز ازطریق حذف مواد استخراجی، موجب افزایش میزان ترکیبات ساختاری و به‌دنبال آن افزایش قابلیت دسترسی به سلولز در مواد لیگنوسلولزی می‌شود. این فرایندها میکروارگانیسم‌های شکمبه را قادر به حملهٔ آسان‌تر به کربوهیدرات‌های ساختاری می‌سازند و فرایند تجزیهٔ آنزیمی تسریع می‌یابد [۲۶]. هیدروکسید سدیم باعث شکسته‌شدن پیوندهای بین لیگنین و کربوهیدرات‌های دیوارهٔ سلولی می‌شود و قابلیت استفاده از آن‌ها را برای باکتری‌های هضم‌کننده بالا می‌برد، درنتیجه گوارش‌پذیری افزایش می‌یابد [۴]. پتانسیل تولید گاز و ثابت نرخ تولید گاز در کاه‌های عمل‌آوری شده با آهک، در طول ۴۸ ساعت انکوباسیون برون‌تنی افزایش یافت [۲۹].

پرتوتابی به‌عنوان روشی ایمن و معتبر برای بهبود ارزش تغذیه‌ای خوراک شناخته شده است و می‌تواند باعث لیگنین‌زدایی، فروپاشی، و دپلیمریزه‌شدن ساختارهای کریستالی سلولز شود [۱۶]. پرتوهای یون‌ساز با تولید یون‌ها و رادیکال‌های آزاد، سبب تجزیهٔ ترکیبات پیچیده به‌ویژه جداسازی پیوندهای بین سلولز و سایر ترکیبات و شکستن پیوندهای کووالانسی می‌شوند [۵]. پرتوتابی گاما در سطح‌های متفاوت، محتوای مادهٔ آلی و الیاف نامحلول در شویندهٔ خنثی و اسیدی کاه گندم را به‌طور شایان توجهی کاهش داد، بدین‌ترتیب سبب افزایش گوارش‌پذیری مادهٔ آلی در شرایط برون‌تنی می‌شود [۲۸]. سطح ۲۰۰ کیلوگری پرتو گاما باعث افزایش تولید گاز در کاه گندم و تفالهٔ گوجه‌فرنگی شد [۲]. تحقیقات بر اجزای سازندهٔ دیوارهٔ سلولی نشان داد استفادهٔ توأم از روش‌های فیزیکی و شیمیایی به‌منظور تجزیهٔ مواد لیگنوسلولزی و بهبود ارزش تغذیه‌ای بقایای کشاورزی کارایی بیشتری دارد، زیرا به‌کمک پرتوتابی ساختارهای لیگنوسلولزی می شکنند و تیمارهای شیمیایی این عمل را تسریع می‌کنند [۶]. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تیمارهای پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، اکسید کلسیم، و ترکیب آن‌ها بر گوارش‌پذیری برون‌تنی و فراسنجه‌های تولید گاز کاه سویا بود.

## مواد و روش‌ها

کاه سویای لازم در فصل پاییز از مزارع استان گلستان

جمع‌آوری شد. پرتوتابی گامای کاه سویا در پژوهشکدهٔ تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج، وابسته به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران انجام گرفت. قبل از پرتوتابی، رطوبت نمونهٔ ماده های خوراکی به ۲۵درصد رسانده شد و سپس در دمای اتاق و اتمسفر هوا با سطح‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری پرتوتابی شدند. پرتوتابی با نرخ متوسط ۰/۳۴ گری در ثانیه، با استفاده از سیستم پرتوتابی آزمایشگاهی مدل PX-30 انجام شد. در این سیستم پرتوتابی از کبالت ۶۰ به‌عنوان چشمهٔ پرتوزای گاما استفاده می‌شود. کنترل کیفی پرتوتابی با به کارگیری سیستم دزی‌متر شیمیایی مرجع فریک، براساس استاندارد ASTM E1026-95 انجام شد [۸]. به‌منظور عمل‌آوری با هیدروکسید سدیم، ۵۰ گرم از این ماده در یک لیتر آب مقطر حل شد و روی یک کیلوگرم مادهٔ خشک کاه عمل‌آوری‌نشده و عمل‌آوری‌شده با سطح‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری پرتو گاما اسپری شد. مخلوط حاصل به‌مدت ۷۲ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی و در شرایط بی‌هوازی نگهداری شد. پس از این مدت، کیسه‌ها باز و نمونه‌ها در معرض هوا خشک شدند. به‌منظور عمل‌آوری با اکسید کلسیم، ابتدا هر کیلوگرم کاه عمل‌آوری نشده و عمل‌آوری شده با سطح‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری پرتو گاما، با دو لیتر آب مقطر کاملاً مخلوط شد. سپس ۱۶۰ گرم اکسید کلسیم به‌صورت پودر روی آن پاشیده شد. نمونه‌ها به‌مدت ۱۴ روز در کیسه‌های پلاستیکی و در شرایط بی‌هوازی نگهداری شدند. پس از این مدت، کیسه‌ها باز و نمونهٔ کاه‌های عمل‌آوری شده در معرض هوا، خشک شدند [۱۴].

تولید گاز تیمارهای آزمایشی براساس روش استاندارد اندازه‌گیری شد [۲۲]. مایع شکمبه قبل از خوراک‌دهی صبح از سه رأس گوسفند نر نژاد دالاق (۲±۴۵) دارای فیستولای شکمبه‌ای به‌دست آمد و با پارچهٔ متقال چهارلایه صاف و بلافاصله به آزمایشگاه انتقال یافت. سپس مایع شکمبه و بزاق مصنوعی تهیه شده به نسبت دو به یک (دو حجم بزاق مصنوعی و یک حجم مایع شکمبه) با هم مخلوط شدند. به مخلوط حاصل گاز دی‌اکسیدکربن تزریق شد و در حمام آب‌گرم با دمای ۳۹ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد. حدود ۲۰۰ میلی‌گرم از مادهٔ خشک هر نمونه خوراک، که قبلاً با الک یک میلی‌متر آسیاب شده بود، داخل بطری‌های شیشه‌ای ریخته شد. سپس مخلوط تهیه شده از مایع شکمبه و بزاق مصنوعی به بطری‌های حاوی نمونه اضافه شد. بلافاصله داخل هر بطری به‌مدت ۱۰ ثانیه گاز دی‌اکسیدکربن دمیده شد و درب آن به‌کمک درپوش لاستیکی و پوشش آلومینیومی به‌طور کامل بسته شد. برای هر نمونه سه تکرار در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور تصحیح گاز تولیدشدهٔ ناشی از ذرات باقی‌مانده در مایع شکمبه، سه بطری به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. بطری‌ها درون حمام آب گرم در دمای ۳۹ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس از تکنیک فشار گاز برای اندازه‌گیری گاز تولیدی استفاده شد. در فواصل زمانی دو، چهار، هشت، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت پس از انکوباسیون، با استفاده از فشارسنج و پس از آن با سرنگ، حجم گاز اندازه‌گیری شد. فراسنجه‌های تولید گاز با نرم‌افزار Fit curve و رابطهٔ ۱ برآورد شد [۲۳]:

$$y = b\,(1 - e^{-ct}) \qquad (1)$$

در این رابطه، y گاز تولیدشده در زمان t، b تولید گاز از بخش نامحلول قابل تخمیر، e عدد نپر، c ثابت نرخ تولید گاز برای بخش b و t زمان کشت هستند.

مقادیر انرژی قابل متابولیسم، انرژی خالص، و گوارش‌پذیری مادهٔ آلی نمونه‌ها به‌ترتیب با روابط ۲، ۳ و ۴ و نیز مقدار اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر به‌کمک رابطهٔ ۵ محاسبه شدند [۲۱]:

(۲)

ME (مگاژول در کیلوگرم مادهٔ خشک) = ۲/۲۰+۰/۱۳۶ GP+۰/۰۵۷ CP+۰/۰۰۲۹ CF

(۳)

NE (مگاژول در کیلوگرم مادهٔ خشک)=- ۰/۳۶+۰/۱۱۴۹GP+۰/۰۰۵۴ CP+۰/۰۱۳۹EE–۰/۰۰۵۴XA

(۴)

OMD(درصد)=۱۴/۸۸+۰/۸۸۹GP+۰/۴۵CP +۰/۰۶۵۱XA

SCFA (میلی‌مول)= ۰/۰۲۲۲GP– ۰/۰۰۴۲۵ (۵)

در این رابطه‌ها؛ GP میزان تولید گاز خالص بعد از ۲۴ ساعت (میلی‌لیتر به‌ازای ۲۰۰ میلی‌گرم مادهٔ خشک)، CP پروتئین خام (درصد)، CF الیاف خام (درصد)، EE چربی خام (درصد) و XA میزان خاکستر (درصد) هستند.

گوارش‌پذیری تیمارهای گوناگون به‌کمک روش کشت بسته اندازه‌گیری شد [۲۲]. بدین‌منظور، ابتدا نمونه‌ها به اندازهٔ یک میلی‌متر آسیاب و سپس خشک شدند. روش تهیهٔ بزاق مصنوعی و جمع‌آوری مایع شکمبه مطابق آنچه در آزمون تولید گاز شرح داده شد، صورت گرفت. با این تفاوت که در اندازه‌گیری گوارش‌پذیری، داخل هر یک از بطری‌های شیشه‌ای ۵۰۰ میلی‌گرم از هر نمونه ریخته شد و ۵۰ میلی‌لیتر از مخلوط بزاق مصنوعی و مایع شکمبه به نسبت دو به یک به هر بطری اضافه شد [۲۲]. سپس به هر بطری به‌مدت ۱۰ ثانیه گاز دی اکسیدکربن دمیده شد و درب آن به‌کمک درپوش لاستیکی و پوشش آلومینیومی به‌طور کامل بسته شد. بطری‌ها درون حمام آب گرم در دمای ۳۹ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، تمامی ویال‌ها از حمام آب گرم خارج و به ظرف حاوی یخ منتقل شدند. نمونه‌های موجود در هر ویال، با پارچهٔ مخصوص از جنس داکرون صاف و محتویات هضم‌نشده از فاز مایع جدا شدند. سپس pH فاز مایع نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از صاف‌کردن محتویات کشت ۲۴ساعته، نمونه‌های حاصل به‌مدت ۴۸ ساعت در آون ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک و سپس گوارش‌پذیری ظاهری محاسبه شد.

میزان نیتروژن آمونیاکی نمونه‌ها از روش فنل‌ـهیپوکلریت و با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۳۰ نانومتر اندازه گیری شد [۱۱]. تودهٔ میکروبی تولیدشده با رابطهٔ ۶ محاسبه شد [۱۰]:

MB (میلی‌گرم) = GP×(PF–۲/۲) (۶)

در این رابطه، MB تولید تودهٔ میکروبی، GP میزان تولید گاز خالص بعد از ۲۴ ساعت (میلی‌لیتر)، و PF عامل تفکیک (میلی‌گرم در میلی‌لیتر) هستند. عامل تفکیک برابر با نسبت میلی‌گرم مادهٔ آلی حقیقی هضم‌شده به میلی‌لیتر حجم گاز خالص تولیدی است. بازده مقدار تودهٔ میکروبی با تقسیم تودهٔ میکروبی تولیدشده بر مقدار مادهٔ آلی حقیقی تخمیرپذیر در پایان زمان انکوباسیون (۲۴ ساعت) محاسبه شد. داده‌های مربوط به تولید گاز و گوارش پذیری با نرم‌افزار آماری SAS و رویهٔ مدل خطی عمومی برای مدل ۷ تجزیه و میانگین‌ها به کمک آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار مقایسه شدند [۲۵]:

$$Y_{ij}=\mu+T_i+e_{ij} \quad (۷)$$

در این رابطه، $Y_{ij}$ مقدار هر مشاهده، $\mu$ میانگین کل، $T_i$ اثر تیمار، و $e_{ij}$ خطای آزمایشی هستند.

## نتایج و بحث

مقایسهٔ میانگین حجم گاز تولیدی تیمارهای گوناگون در زمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲، و ۹۶ ساعت پس از انکوباسیون در جدول ۱ ارائه شده است. کلیه تیمارها به‌جز کاه فراوری‌شده با پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) تا چهار ساعت بعد از انکوباسیون تولید گاز نداشتند.

جدول۱. اثر پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر حجم تولید گاز کاه سویا در زمان‌های گوناگون انکوباسیون (میلی‌لیتر در گرم مادهٔ خشک)

| تیمارها | زمان انکوباسیون (ساعت) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۲ | ۴ | ۶ | ۸ | ۱۲ | ۲۴ | ۳۶ | ۴۸ | ۷۲ | ۹۶ |
| شاهد | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۹/۳۳$^{f}$ | ۲۴/۳۳$^{b}$ | ۳۷/۵۰$^{d}$ | ۶۷/۶۷$^{g}$ | ۸۹/۳۳$^{d}$ | ۱۰۴/۳۳$^{d}$ | ۱۲۰/۸۳$^{d}$ | ۱۳۳/۱۷$^{e}$ |
| پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۲/۶۷$^{a}$ | ۲۲/۶۷$^{a}$ | ۲۶/۷۰$^{ab}$ | ۵۸/۳۳$^{a}$ | ۱۰۱/۶۷$^{bc}$ | ۱۳۵/۶۷$^{a}$ | ۱۵۴/۰۰$^{a}$ | ۱۷۱/۱۷$^{ab}$ | ۱۹۱/۳۳$^{b}$ |
| پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۴/۰۰$^{a}$ | ۲۱/۶۷$^{ab}$ | ۳۰/۸۳$^{a}$ | ۵۳/۸۳$^{ab}$ | ۹۱/۶۷$^{de}$ | ۱۲۴/۳۳$^{b}$ | ۱۴۱/۰۰$^{b}$ | ۱۶۰/۰۰$^{b}$ | ۱۸۰/۶۷$^{bc}$ |
| هیدروکسید سدیم | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۶/۵۰$^{f}$ | ۲۷/۵۰$^{ab}$ | ۵۳/۱۷$^{ab}$ | ۹۴/۸۳$^{cd}$ | ۱۲۱/۶۷$^{b}$ | ۱۴۰/۵۰$^{b}$ | ۱۶۰/۵۰$^{b}$ | ۱۷۵/۰۰$^{cd}$ |
| اکسید کلسیم | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۱۷/۰۰$^{cde}$ | ۲۸/۶۷$^{ab}$ | ۴۹/۵۰$^{bc}$ | ۸۴/۱۷$^{ef}$ | ۱۰۷/۶۷$^{c}$ | ۱۱۷/۸۳$^{c}$ | ۱۳۲/۰۰$^{cd}$ | ۱۷۲/۶۷$^{cd}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۱۶/۰۰$^{de}$ | ۲۷/۶۷$^{ab}$ | ۵۴/۰۰$^{ab}$ | ۱۰۵/۶۷$^{ab}$ | ۱۴۲/۰۰$^{a}$ | ۱۶۰/۵۰$^{a}$ | ۱۸۱/۵۰$^{a}$ | ۲۱۲/۳۳$^{a}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۱۸/۵۰$^{bcd}$ | ۲۹/۸۳$^{ab}$ | ۵۵/۶۷$^{a}$ | ۱۱۰/۶۷$^{a}$ | ۱۴۴/۵۰$^{a}$ | ۱۶۰/۵۰$^{a}$ | ۱۷۸/۸۳$^{a}$ | ۲۱۶/۸۳$^{a}$ |
| اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۱۴/۸۳$^{e}$ | ۲۴/۰۰$^{b}$ | ۴۴/۸۳$^{c}$ | ۸۱/۰۰$^{f}$ | ۱۰۸/۶۷$^{c}$ | ۱۱۸/۰۰$^{c}$ | ۱۳۱/۳۳$^{cd}$ | ۱۶۹/۵۰$^{d}$ |
| اکسید کلسیم + پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰$^{b}$ | ۱۹/۳۳$^{bc}$ | ۲۹/۰۰$^{ab}$ | ۴۹/۶۷$^{bc}$ | ۸۶/۳۳$^{def}$ | ۱۱۵/۳۳$^{bc}$ | ۱۲۵/۸۳$^{c}$ | ۱۳۹/۵۰$^{c}$ | ۱۷۵/۱۷$^{cd}$ |
| اشتباه معیار میانگین‌ها | ۰/۰۰۰ | ۰/۶۹۶ | ۱/۰۷۹ | ۲/۱۳۰ | ۱/۸۹۳ | ۲/۹۰۰ | ۳/۶۴۸ | ۴/۰۴۵ | ۳/۹۷۲ | ۳/۷۱۶ |
| P-value | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۳ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۳۴۱۹ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| مقایسهٔ گروهی | | | | | | | | | | |
| شاهد در برابر عمل‌آوری | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۴۶۲ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۱۱۳۵ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر پرتوگاما | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۱۰ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۱۲۷۳ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۰۸۴۰ | ۰/۱۶۷۳ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر پرتو گاما+ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۱۸۳۴ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| پرتو گاما در برابر ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۸۴۶۹ | ۰/۰۱۴۱ | ۰/۰۲۳۶ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۴۲ |

a-f: تفاوت اعداد در هر ستون، با حروف غیرمشابه معنی‌دار است (P<۰/۰۵).

جدول ۲. تأثیرات پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر فراسنجه‌های تولید گاز کاه سویا

| تیمارها | پتانسیل تولید گاز (میلی‌لیتر) | ثابت نرخ تولید گاز (میلی‌لیتر در ساعت) | گوارش‌پذیری مادهٔ آلی (درصد) | انرژی قابل متابولیسم (مگاژول در کیلوگرم) | انرژی خالص (مگاژول درکیلوگرم) | اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر (میلی‌مول) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| شاهد | ۱۴۲/۷۸$^{e}$ | ۰/۰۲۸$^{ab}$ | ۲۹/۰۴$^{f}$ | ۴/۳۱$^{f}$ | ۱/۲۳$^{e}$ | ۰/۲۹۷$^{g}$ |
| پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۲۰۰/۱۴$^{b}$ | ۰/۰۳۱$^{a}$ | ۳۵/۳۳$^{bc}$ | ۵/۲۶$^{ab}$ | ۲/۰۲$^{ab}$ | ۰/۴۴۷$^{bc}$ |
| پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۱۹۰/۵۷$^{bc}$ | ۰/۰۳۰$^{ab}$ | ۳۳/۳۲$^{de}$ | ۴/۹۶$^{cd}$ | ۱/۸۰$^{c}$ | ۰/۴۰۳$^{de}$ |
| هیدروکسید سدیم | ۱۸۵/۴۷$^{cd}$ | ۰/۰۳۱$^{a}$ | ۳۴/۲۵$^{cd}$ | ۵/۰۳$^{bc}$ | ۱/۸۵$^{bc}$ | ۰/۴۱۷$^{cd}$ |
| اکسید کلسیم | ۱۷۶/۷۸$^{cd}$ | ۰/۰۲۶$^{b}$ | ۳۳/۲۶$^{de}$ | ۴/۷۶$^{de}$ | ۱/۴۸$^{d}$ | ۰/۳۷۰$^{ef}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۲۲۵/۸۹$^{a}$ | ۰/۰۲۷$^{ab}$ | ۳۶/۱۸$^{ab}$ | ۵/۳۳$^{a}$ | ۲/۰۵$^{a}$ | ۰/۴۶۳$^{ab}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۲۲۵/۳۰$^{a}$ | ۰/۰۲۸$^{ab}$ | ۳۷/۱۷$^{a}$ | ۵/۴۸$^{a}$ | ۲/۱۶$^{a}$ | ۰/۴۸۷$^{a}$ |
| اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۱۷۵/۶۷$^{d}$ | ۰/۰۲۵$^{b}$ | ۳۲/۰۸$^{e}$ | ۴/۵۷$^{e}$ | ۱/۴۱$^{de}$ | ۰/۳۵۷$^{f}$ |
| اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۱۷۹/۰۶$^{cd}$ | ۰/۰۲۸$^{ab}$ | ۳۳/۱۵$^{de}$ | ۴/۷۴$^{de}$ | ۱/۵۲$^{d}$ | ۰/۳۸۰$^{def}$ |
| اشتباه معیار میانگین‌ها | ۴/۸۰۰۰ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۵۱۳ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۱۳ |
| P-value | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۱۵۸۹ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| مقایسهٔ گروهی | | | | | | |
| شاهد در برابر عمل‌آوری | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۴۳۶۶ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر پرتو گاما | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۲۱۹۹ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر ترکیبات شیمیایی | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۸۵۸۰ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| شاهد در برابر پرتوگاما+ترکیبات شیمیایی | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۴۳۶۶ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| پرتو گاما در برابر ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۸۲ | ۰/۱۹۸۸ | <۰/۲۸۲۲ | ۰/۰۱۲۴ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۰۲۳۵ |

a-f: تفاوت اعداد در هر ستون، با حروف غیرمشابه معنی‌دار است (P<۰/۰۵).

عمل‌آوری کاه سویا بر تولید گاز در زمان‌های گوناگون انکوباسیون تأثیر گذاشت (P<۰/۰۵). از زمان هشت تا ۹۶ ساعت انکوباسیون، درمجموع بیشترین تولید گاز در تیمارهای هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد (P <۰/۰۵). نتایج حاصل از تأثیر پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر مقادیر فراسنجه های تولید گاز و فراسنجه‌های تخمینی کاه سویا در جدول ۲ نشان داده شده است.

روش‌های گوناگون عمل‌آوری، پتانسیل تولید گاز را افزایش دادند (P<۰/۰۱). در این خصوص، تأثیر پرتو گاما بیشتر از ترکیبات شیمیایی بود (P<۰/۰۱). در پایان مدت انکوباسیون، بیشترین پتانسیل تولید گاز مربوط به تیمارهای هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد بود.

طبق نتایج مقایسات گروهی، عمل‌آوری کاه سویا با تیمارهای متفاوت سبب افزایش گوارش پذیری مادهٔ آلی، انرژی قابل متابولیسم، انرژی خالص، و اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر شد (P<۰/۰۱). در این خصوص، تأثیر پرتو گاما بیشتر از ترکیبات شیمیایی بود (P<۰/۰۱). عمل‌آوری توأم ترکیبات شیمیایی و پرتو گاما نیز افزایش معنی‌دار فراسنجه‌های اشاره‌شده را درپی داشت (P<۰/۰۱).

نتایج مقایسهٔ میانگین نشان داد که عمل‌آوری با تیمارهای متفاوت باعث افزایش این فراسنجه‌ها شد (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار گوارش‌پذیری مادهٔ آلی و اسیدهای چرب کوتاه زنجیر در تیمارهای هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد. بیشترین مقدار انرژی قابل متابولیسم و انرژی خالص در تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) و هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) به‌دست آمد.

عمل‌آوری با پرتو گاما باعث لیگنین‌زدایی، دپلیمریزه شدن، و شکستن پیوندهای کووالانسی و تغییر در ساختار بلوری سلولز می‌شود [۱۶]. عمل‌آوری مواد لیگنوسلولزی با ترکیبات شیمیایی، منجر به دفع لیگنین و همی‌سلولز، کاهش بلورینگی سلولز، و افزایش تخلخل سطح ماده و درنتیجه تسهیل تجزیهٔ میکربی سلولز می‌شود [۲۶]. نتیجهٔ تمامی تغییرات حاصل از عمل‌آوری مواد لیگنوسلولزی، افزایش قابلیت حل ترکیبات دیوارهٔ سلولی است. در پژوهش حاضر نیز روش‌های گوناگون عمل‌آوری بر تولید گاز کاه سویا تأثیرگذار بودند.

به‌دلیل وجود همبستگی منفی بین الیاف نامحلول در شویندهٔ خنثی و اسیدی و نرخ و حجم گاز تولیدی، کاهش در میزان الیاف نامحلول در شویندهٔ اسیدی باعث افزایش گاز تولیدی شد [۱۷]. این امر ممکن است درنتیجهٔ افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها به‌دلیل دریافت منابع کربوهیدرات محلول باشد [۲۷]. همچنین بین منبع کربوهیدرات و منبع نیتروژن برای کینتیک تولید گاز اثر متقابل وجود دارد. هرچه همزمانی بین تجزیه‌پذیری کربوهیدرات و نیتروژن بهتر و نسبت نیتروژن به کربوهیدرات متناسب‌تر با نیاز میکروب‌ها باشد، بهبود در فرایند تخمیر در محیط تولید گاز قابل انتظار است [۱۵].

گزارش‌های بسیاری در زمینهٔ بهبود فرایند تخمیر و تولید گاز در اثر استفاده از ترکیبات شیمیایی [۳۶] و پرتوتابی [۲، ۲۸] ارائه شده است. کاهش الیاف نامحلول در شویندهٔ خنثی در اثر تیمار هیدروکسید سدیم، نقش مهمی در افزایش گوارش‌پذیری و تولید گاز دارد. درحقیقت آزادشدن همی‌سلولز با این ترکیب شیمیایی باعث دسترس‌پذیرترشدن آن برای آنزیم‌ها و درنتیجه افزایش راندمان بهره‌وری انرژی آن می‌شود [۱۳]. مقدار تولید گاز اولیه، پتانسیل تولید گاز، و ثابت نرخ تولید گاز در کاه‌های عمل‌آوری شده با آهک در طول ۴۸ ساعت انکوباسیون افزایش می یابد [۲۹]. محققان در بررسی تأثیر سطح‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، و ۲۰۰۰ کیلوگری پرتو گاما بر ترکیب

شیمیایی و فراسنجه‌های تخمیری کاه برنج بیان کردند که تولید گاز تجمعی ناشی از تخمیر کاه با سطح‌های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگری پرتو گاما افزایش یافت. اما سطح‌های پایین‌تر از ۱۵۰۰ کیلوگری، تأثیری بر فراسنجه‌های تولید گاز نداشت [۲۸]. تیمار کاه گندم با هیدروکسید سدیم و پرتو گاما (۲۰۰ کیلوگری)، مقدار تولید گاز تجمعی و پتانسیل تولید گاز را افزایش می دهد. همچنین عمل‌آوری با هیدروکسید سدیم سبب افزایش نرخ تولید گاز شد ولی عمل‌آوری با پرتو گاما (۵۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ کیلوگری) تأثیری در افزایش نرخ تولید گاز نداشت که با نتایج پژوهش حاضر توافق دارد [۲].

در پژوهش حاضر، فراسنجه‌های تخمینی شامل گوارش پذیری مادهٔ آلی، انرژی قابل متابولیسم، انرژی خالص، و اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر تحت‌تأثیر عمل‌آوری با تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری)، هیدروکسید سدیم، اکسید کلسیم، و ترکیب آن‌ها افزایش یافتند. تأثیر عمل‌آوری شیمیایی بر گوارش‌پذیری الیاف، ناشی از افزایش قابلیت تخمیر این مواد است. باتوجه به این‌که میزان کربوهیدرات محلول موجود در کاه بسیار کم است (۰/۱ تا ۲درصد)، حملهٔ میکروارگانیسم‌ها و تشکیل کلنی‌های باکتریایی در سطح کاه با تأخیر انجام می‌شود و شروع فرایند هضم به‌طول می‌انجامد. بنابراین عمل‌آوری شیمیایی با فراهم آوردن کربوهیدرات‌های محلول بیشتر، موجب افزایش اتصال میکروب‌ها شده و تجزیه پذیری پلی‌ساکاریدهای دیوارهٔ سلولی بهبود یافته است [۲۹].

پرتوهای یون‌ساز با تولید یون‌ها و رادیکال‌های آزاد، سبب دپلیمریزه‌شدن ترکیبات پیچیده به‌ویژه جداسازی پیوندهای بین سلولز و سایر ترکیبات و شکستن پیوندهای کووالانسی می‌شوند. بدین ترتیب باعث افزایش تجزیهٔ شکمبه‌ای ترکیبات لیگنوسلولزی می‌شوند [۵]. عمل‌آوری تفالهٔ نیشکر با بخاردهی و هیدروکسید سدیم، باعث افزایش در تجزیه پذیری دیوارهٔ سلولی، گوارش پذیری مادهٔ آلی و انرژی قابل متابولیسم شده است [۱۲]. افزایش انرژی قابل متابولیسم و گوارش‌پذیری مادهٔ آلی در برخی محصولات فرعی زراعی عمل‌آوری‌شده با پرتو گاما و هیدروکسید سدیم گزارش شده است [۶].

در پژوهش حاضر، همبستگی بین حجم گاز تولیدی و انرژی قابل متابولیسم معنی‌دار بود (r=۰/۹۹۴۶ و P=۰/۰۰۰۱). حجم گاز تولیدی در 24 ساعت پس از انکوباسیون، با انرژی قابل متابولیسم خوراک در ارتباط است [۲۱]. بالابودن میزان گاز تولیدی بیانگر بالابودن انرژی متابولیسمی و همچنین نیتروژن قابل تخمیر و سایر مواد مغذی لازم برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها است (۳). در پژوهش حاضر، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تولید گاز و اسیدهای چرب فرار کوتاه زنجیر مشاهده شد (r=۰/۹۹۹۹ و P=۰/۰۰۰۱) که با نتایج دیگران هم‌خوانی دارد [۱۰، ۲۱]. افزایش مقدار اسیدهای چرب فرار کوتاه زنجیر، منجر به افزایش تولید گاز شده که برآمدی از افزایش در گوارش پذیری و ارزش انرژی است. حجم گاز تولیدی، منعکس کنندهٔ تخمیر مواد خوراکی به اسیدهای چرب فرار کوتاه زنجیر است. این صفت به‌طور دقیقی با مقدار و نسبت استات و بوتیرات مرتبط است، زیرا فقط تخمیر مادهٔ خوراکی به استات و بوتیرات است که تولید گاز دی‌اکسیدکربن و گاز متان می‌کند [۹].

نتایج حاصل از تأثیر پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی، نیتروژن آمونیاکی، pH، و فراسنجه‌های تخمینی کاه سویا در جدول ۳ نشان داده شده است. کاه عمل آوری شده با دزهای ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری، هیدروکسید سدیم، و هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) باعث افزایش گوارش پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی کاه سویا در مقایسه با شاهد شدند (P<۰/۰۵). در پژوهش حاضر،

بیشترین گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی مربوط به تیمارهای حاوی هیدروکسید سدیم (هیدروکسید سدیم و هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) بود که مقدار گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی را به‌ترتیب ۵۱/۱۰، ۵۰/۹۷، ۵۸/۸۰درصد و نیز ۴۱/۷۴، ۴۱/۵۲، و ۵۰/۱۰ درصد به نسبت تیمار شاهد افزایش دادند.

در دیوارهٔ سلولی، همی‌سلولز در پیوند با سلولز قرار دارد. هضم میکروبی سلولز تا زمانی‌که همی‌سلولز برداشته یا شکسته نشود، محدود خواهد بود. از طرف دیگر، هضم میکروبی همی‌سلولز به‌دلیل اتصال آن با لیگنین و اسیدهای فنلی پایین است. بنابراین لیگنین‌زدایی باعث حل شدن بیشتر همی‌سلولز و درنتیجه افزایش هضم همی‌سلولز و سلولز خواهد شد [۱۳]. عمل‌آوری مواد الیافی با ترکیبات شیمیایی، موجب تورم دیوارهٔ سلولی، کاهش بلورینگی، و انسجام سلولز می‌شود. چنین موادی عوامل هیدروکسیل واحدهای گلوکز در مولکول سلولز را در معرض واکنش قرار می‌دهند و باعث کاهش شدت بلورینگی سلولز می شوند. این امر اثر پوشانندگی موادی چون لیگنین و سیلیس را بر سلولز کاهش و آمادگی دیوارهٔ سلولی را برای هیدرولیز افزایش می‌دهد [۱]. اثر بازدارندگی اسیدهای فنلی نیز در هضم کربوهیدرات‌های ساختمانی به‌وسیلهٔ ترکیبات شیمیایی حذف یا محدود می‌شود [۱۳]. بنابراین، بهبود چشم‌گیری در گوارش‌پذیری سلولز در کاه عمل‌آوری‌شده با مواد شیمیایی صورت می‌گیرد. هیدروکسید سدیم با شکستن پیوندهای بین لیگنین و کربوهیدرات‌های دیوارهٔ سلولی قابلیت استفاده از آن‌ها را برای باکتری‌های هضم‌کننده بیشتر می‌کند. این امر باعث افزایش گوارش‌پذیری می‌شود [۴].

همسو با نتایج پژوهش حاضر، افزایش گوارش پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی درنتیجهٔ استفاده از هیدروکسید سدیم گزارش شده است [۴، ۶، ۷]، اما در یک پژوهش بهبودی در گوارش‌پذیری مادهٔ آلی در اثر افزودن هیدروکسید سدیم حاصل نشد [۱۲]. در رابطه با تأثیر اکسید کلسیم بر مواد الیافی، شرایط عمل‌آوری (حرارت، رطوبت، زمان، و مانند اینها) بسیار مهم است [۲۹]. شرایط مناسب برای عمل‌آوری با اکسید کلسیم هنوز به‌درستی شناخته نشده است. استفاده از اکسید کلسیم برای عمل‌آوری با وجود مزایای فراوانی که دارد، درعمل با محدودیت‌های فراوانی نیز همراه است. اکسید کلسیم مادهٔ شیمیایی ضعیف‌تری در مقایسه با هیدروکسید سدیم بوده و تأثیر آن بر دیوارهٔ سلولی کمتر است. محلولیت اکسید کلسیم در آب کم بوده و در مقایسه با هیدروکسید سدیم مدت بیشتری برای عمل‌آوری با آن لازم است [۲۴].

در پژوهش حاضر، پایین‌ترین میزان گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی در تیمارهای حاوی اکسید کلسیم مشاهده شد. مطابق آن‌چه در شرایط آزمایش مشاهده شد، محلول اکسید کلسیم روی کاه سویا باقی ماند که به‌دلیل ماهیت نامحلول‌بودن، به‌خوبی با کاه مخلوط نشد. در پژوهشی تأثیر اکسید کلسیم و هیدروکسید کلسیم بر گوارش پذیری برون‌تنی کاه سویا بررسی و در نتایج مشاهده شد که تیمارهای اعمال‌شده با این‌که دیوارهٔ سلولی کاه سویا را کاهش دادند، اما تأثیری بر گوارش پذیری برون‌تنی نداشتند [۱۸]. در پژوهش حاضر، پرتوتابی باعث افزایش گوارش پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی کاه سویا شد. هرچند بین سطح‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری اختلافی مشاهده نشد. به‌نظر می‌رسد که استفادهٔ توأم از روش‌های فیزیکی و شیمیایی به‌منظور تجزیهٔ مواد لیگنوسلولزی و بهبود ارزش تغذیه‌ای بقایای کشاورزی کارایی بیشتری دارد، زیرا به کمک پرتوتابی ساختارهای لیگنوسلولزی شکسته می شوند و تیمارهای شیمیایی این عمل را سریع‌تر می‌کنند [۷].

جدول ۳. تأثیرات پرتو گاما، هیدروکسید سدیم، و اکسید کلسیم بر گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و مادهٔ آلی، نیتروژن آمونیاکی، pH، و فراسنجه‌های تخمینی کاه سویا

| تیمارها | گوارش‌پذیری مادهٔ خشک (درصد) | گوارش‌پذیری مادهٔ آلی (درصد) | نیتروژن آمونیاکی محیط کشت (میلی‌گرم بر دسی‌لیتر) | pH محیط کشت | عامل تفکیک (میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) | گاز تولیدشده پس از ۲۴ ساعت انکوباسیون (میلی‌لیتر) | تودهٔ میکروبی تولیدشده در پایان ۲۴ ساعت انکوباسیون | بازده تولید تودهٔ میکروبی در پایان ۲۴ ساعت انکوباسیون |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شاهد | ۳۶/۴۰$^{d}$ | ۳۵/۷۷$^{d}$ | ۱۵/۵۰$^{ab}$ | ۶/۷۲$^{e}$ | ۵/۳۵$^{a}$ | ۶۳/۳۱$^{f}$ | ۹۹/۷۴$^{ab}$ | ۰/۵۸۸$^{a}$ |
| پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۴۴/۷۳$^{b}$ | ۴۴/۵۸$^{b}$ | ۱۵/۴۵$^{ab}$ | ۶/۸۳$^{cde}$ | ۳/۹۱$^{cd}$ | ۱۰۶/۲۹$^{a}$ | ۹۰/۹۲$^{b}$ | ۰/۴۳۷$^{cd}$ |
| پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۴۳/۱۳$^{bc}$ | ۴۲/۵۵$^{bc}$ | ۱۶/۳۲$^{a}$ | ۶/۸۳$^{cde}$ | ۴/۰۱$^{bcd}$ | ۹۹/۸۲$^{c}$ | ۹۰/۴۸$^{b}$ | ۰/۴۵۱$^{bcd}$ |
| هیدروکسید سدیم | ۵۵/۰۰$^{a}$ | ۵۰/۷۰$^{a}$ | ۱۳/۶۸$^{d}$ | ۶/۹۵$^{bc}$ | ۴/۵۶$^{b}$ | ۹۷/۱۴$^{c}$ | ۱۱۴/۳۰$^{a}$ | ۰/۵۱۷$^{ab}$ |
| اکسید کلسیم | ۳۴/۷۳$^{d}$ | ۳۷/۴۰$^{d}$ | ۱۳/۹۰$^{cd}$ | ۷/۱۶$^{a}$ | ۴/۱۳$^{bcd}$ | ۶۸/۰۸$^{e}$ | ۶۴/۸۳$^{c}$ | ۰/۴۵۹$^{bcd}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۵۴/۹۳$^{a}$ | ۵۰/۶۲$^{a}$ | ۱۴/۰۰$^{cd}$ | ۶/۸۷$^{cd}$ | ۴/۴۱$^{bc}$ | ۱۰۰/۳۴$^{bc}$ | ۱۱۰/۴۵$^{ab}$ | ۰/۵۰۰$^{bc}$ |
| هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۵۷/۸۰$^{a}$ | ۵۳/۶۹$^{a}$ | ۱۴/۱۰$^{cd}$ | ۶/۸۱$^{de}$ | ۴/۴۸$^{bc}$ | ۱۰۴/۸۱$^{ab}$ | ۱۱۸/۸۷$^{a}$ | ۰/۵۰۶$^{bc}$ |
| اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) | ۳۶/۵۳$^{d}$ | ۳۹/۱۲$^{cd}$ | ۱۲/۰۳$^{e}$ | ۶/۹۵$^{bc}$ | ۴/۲۰$^{bcd}$ | ۷۰/۳۴$^{e}$ | ۶۹/۷۸$^{c}$ | ۰/۴۷۱$^{bcd}$ |
| اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) | ۳۸/۶۰$^{cd}$ | ۴۰/۳۹$^{bcd}$ | ۱۴/۹۸$^{bc}$ | ۷/۰۵$^{ab}$ | ۳/۷۳$^{d}$ | ۸۱/۴۹$^{d}$ | ۶۱/۹۸$^{c}$ | ۰/۴۰۵$^{d}$ |
| اشتباه معیار میانگین‌ها | ۱/۹۳۴ | ۱/۵۵۸ | ۰/۴۴۳ | ۰/۰۴۴ | ۰/۲۰۱ | ۱/۵۱۸ | ۶/۹۶۹ | ۰/۰۲۶ |
| P-value | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۱۲ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۵۱ |
| مقایسهٔ گروهی | | | | | | | | |
| شاهد در برابر عمل‌آوری | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۱۸۱۴ | ۰/۰۰۰۳ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۲۳۳۱ | ۰/۰۰۰۵ |
| شاهد در برابر پرتو گاما | ۰/۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۴۷۸۲ | ۰/۰۶۸۹ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۳۰۳۳ | ۰/۰۰۰۳ |
| شاهد در برابر ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۲۰ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۷ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۲۴۸۳ | ۰/۰۰۵۷ |
| شاهد در برابر پرتو گاما+ترکیبات شیمیایی | ۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۷ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۲۳۹۵ | ۰/۰۰۰۸ |
| پرتو گاما در برابر ترکیبات شیمیایی | ۰/۶۳۴۹ | ۰/۷۵۸۹ | <۰/۰۰۰۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۷۶۲ | <۰/۰۰۰۱ | ۰/۸۷۲۱ | ۰/۱۰۷۸ |

a-f: تفاوت اعداد در هر ستون، با حروف غیرمشابه معنی‌دار است (P<۰/۰۵).

در پژوهش حاضر نیز استفادهٔ توأم از پرتو گاما و هیدروکسید سدیم، باعث افزایش بیشتر گوارش پذیری شد. افزایش گوارش پذیری برخی محصولات فرعی زراعی در اثر تیمارهای پرتو گاما و هیدروکسید سدیم گزارش شد [۶].

نتایج مقایسات گروهی نشان داد که عمل‌آوری با پرتو گاما تأثیری بر غلظت نیتروژن آمونیاکی نداشت، اما عمل‌آوری شیمیایی باعث کاهش این صفت شد (P<۰/۰۱). استفادهٔ توأم از پرتو گاما و ترکیبات شیمیایی نیز باعث کاهش نیتروژن آمونیاکی شد (P<۰/۰۱). طبق نتایج مقایسهٔ میانگین کمترین مقدار این صفت در تیمار اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) مشاهده شد. غلظت نیتروژن آمونیاکی از مؤلفه‌های مهم در برآورد مصرف مادهٔ خشک و گوارش‌پذیری الیاف است. در پژوهش حاضر، نیتروژن آمونیاکی در تمامی تیمارها به‌جز پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) کاهش یافت. در پژوهشی گوارش پذیری کاه گندم در اثر عمل‌آوری با هیدروکسید سدیم در شکمبه و کل دستگاه گوارش بهبود یافت. همچنین غلظت آمونیاک کاهش و سطح اسیدهای چرب فرار شکمبه افزایش یافت. افزایش سطح اسیدهای چرب فرار معمولاً ناشی از بالارفتن میزان تخمیر در شکمبه است. از طرف دیگر، بالارفتن میزان هضم و انرژی دسترس پذیر در شکمبه موجب تحریک باکتری‌ها به رشد بیشتر شده است، درنتیجه آمونیاک بیشتری مصرف می‌شود [۱۳].

تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) و هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) تأثیری بر pH محیط کشت نداشتند، سایر تیمارها باعث افزایش آن شدند (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار pH در تیمارهای اکسید کلسیم مشاهده شد، هرچند اختلاف آن با تیمار اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) معنی‌دار نبود. pH مایع شکمبه، تعادلی از غلظت اسیدهای چرب فرار عمده در شکمبه (استات، پروپیونات، بوتیرات، و لاکتات)، آمونیاک، بافر، و بزاق است [۳۰]. هرچه میزان تخمیر شکمبه‌ای افزایش یابد، محصولات فرعی حاصل از آن یعنی اسیدهای چرب فرار نیز افزایش می یابد که این باعث کاهش pH شکمبه می شود. در این پژوهش تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) تأثیری بر pH مایع شکمبه نداشتند، اما تیمارهای ترکیبات شیمیایی، pH محیط کشت را به سمت قلیایی شدن پیش بردند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، زمان استفاده از اکسید کلسیم، ذرات آن بر کاه سویا رسوب و به‌دلیل ماهیت قلیایی همانند بافر در مقابل pH پایین محیط کشت مقاومت می‌کند. زمانی‌که اکسید کلسیم طی عمل‌آوری با آب ترکیب می‌شود، سریعاً به هیدروکسید کلسیم تبدیل می‌شود [۲۹]. عمل‌آوری کاه با هیدروکسید سدیم باعث ترکیب سدیم با کربن‌های دیوارهٔ کاه و تشکیل کربنات سدیم می‌شود، درنتیجه pH کاه افزایش می‌یابد [۳۰].

تمامی تیمارها مقدار عامل تفکیک را کاهش دادند (P<۰/۰۵). کمترین مقدار عامل تفکیک در تیمار اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد. هرچند که تفاوت آن با تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) و اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) معنی‌دار نبود. مقدار گاز تولیدشده بعد از ۲۴ ساعت انکوباسیون توسط تمام تیمارها افزایش یافت (P<۰/۰۵). بیشترین مقدار تولید گاز در تیمارهای پرتو گاما (۱۰۰ کیلوگری) و هیدروکسید سدیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) مشاهده شد. نتایج مقایسات گروهی نشان داد که در مجموع عمل‌آوری تأثیری بر تولید تودهٔ میکروبی نداشت (P=۰/۲۳۳۱). تیمارهای اکسید کلسیم و اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگری) باعث کاهش تولید تودهٔ میکروبی شدند (P<۰/۰۵). در بین تیمارهای عمل‌آوری‌شده، بالاترین بازده تولید تودهٔ میکروبی مربوط به تیمار هیدروکسید سدیم و پایین‌ترین مقدار مربوط به تیمار اکسید کلسیم+پرتو گاما (۱۵۰ کیلوگری) بود.

در پژوهش حاضر، عامل تفکیک در محدودهٔ ۳/۷۳ تا ۵/۳۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر قرار داشت. مقدار عامل تفکیک در خوراک‌های متعارف بین ۲/۷۴ تا ۴/۶۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر گزارش شده است [۱۰]. در پژوهش حاضر عامل تفکیک کاه سویای عمل‌آوری نشده ۵/۳۵ میلی‌گرم در میلی‌لیتر به‌دست آمد که بالاتر از محدودهٔ متعارف بود که احتمالاً دلیل آن وجود عامل ضدتغذیه‌ای در کاه سویا است. عامل تفکیک بالاتر از ۹/۹۳ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در برخی از گیاهان غنی از تانن گزارش شده است [۲۰]. وجود عوامل ضدتغذیه‌ای به این دلیل باعث بالارفتن عامل تفکیک می‌شوند که ممکن است در جریان تخمیر و هضم، از نمونهٔ خوراکی شسته و در ناپدیدشدن مادهٔ خشک سهیم شوند، بدون آن‌که در فرایند تخمیر (تولید گاز) مشارکتی داشته باشند، یا این‌که این عوامل ضدتغذیه‌ای سبب جلوگیری از حلالیت سایر ترکیبات به‌خصوص پروتئین‌ها شده باشند. درواقع باعث رقیق‌شدگی مواد مغذی شده‌اند و در ازای گوارش‌پذیری به‌دست آمده، تولید گاز و تولید پروتئین میکروبی صورت نگرفته است [۲۰].

در پژوهش حاضر، همبستگی معنی‌داری بین تولید گاز و تولید تودهٔ میکروبی مشاهده نشد (P=۰/۱۳۸۲ و ۰/۵۳= r). هرچند از نظر عددی تیمار شاهد با کمترین مقدار تولید گاز، بیشترین میزان تولید تودهٔ میکروبی را داشت. همبستگی منفی بین تولید گاز و تولید تودهٔ میکروبی مشاهده شده است [۱۰]. همچنین در این پژوهش، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تولید گاز با قابلیت هضم مادهٔ خشک و مادهٔ آلی کاه سویا مشاهده شد (به‌ترتیب r=۰/۸۴۱۲، r=۰/۸۹۷۷، P=۰/۰۰۴۵ و P=۰/۰۰۱۰). در شرایط برون‌تنی، همبستگی بالایی بین گوارش‌پذیری مادهٔ خشک و گوارش‌پذیری مادهٔ آلی با حجم گاز وجود دارد [۹، ۲۷]. بالابودن میزان گوارش‌پذیری به‌دلیل کمتربودن میزان لیگنین و الیاف نامحلول در شویندهٔ خنثی و اسیدی تحت‌تأثیر تیمارهای گوناگون است [۳۰].

براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر، تیمارهای پرتو گاما و هیدروکسید سدیم و استفادهٔ توأم از آن‌ها باعث بهبود فراسنجه‌های تولید گاز و گوارش‌پذیری کاه سویا در شرایط برون‌تنی می‌شوند. مطالعات درون‌تنی به‌منظور بررسی تأثیر این تیمارها بر ارزش تغذیه‌ای کاه سویا لازم است. ضمن این‌که صرفهٔ اقتصادی استفاده از فرایند پرتوتابی در عمل‌آوری بقایا و محصولات فرعی زراعی باید بررسی شود.

## منابع


۱. دارایی گرمه‌خانی ا (۱۳۹۲) بهینه‌سازی قندهای قابل تخمیر از بقایای لیگنوسلولزی کلزا با استفاده از پیش‌تیمارهای نوین. رسالهٔ دکتری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲. سبحانی راد س، بهگر م، وکیلی ر و الهی ترشیزی م (۱۳۹۱) تأثیر پرتوتابی گاما و عمل‌آوری با سود سوزآور بر فراسنجه‌های تولید گاز برخی از محصولات فرعی کشاورزی در شرایط آزمایشگاهی (*in vitro*). پژوهش‌های علوم دامی ایران. ۴(۴): ۳۱۶-۳۲۲.

۳. مقدم م، تقی‌زاده ا، نوبخت ع و احمدی ا (۱۳۹۰) ارزش غذایی تفالهٔ انگور و برگ مو کشمشی با استفاده از روش‌های کیسه‌های نایلونی و تولید گاز. پژوهش‌های علوم دامی ایران. ۳(۴): 435 -443.

۴. یلچی ط، کارگر ش، خوروش م و قربانی غ (۱۳۹۱) اثر هیدروکسید سدیم بر روی ترکیبات شیمیایی و قابلیت هضم آزمایشگاهی کاه سویا. پنجمین کنگره علوم دامی ایران. دانشگاه صنعتی اصفهان.

5. Alberti A, Bertini S, Gastaldi G, Iannaccone N, Macciantelli D, Torri G and Vismara E (2005) Electron beam-irradiated textile cellulose fibers. European Polymer Journal. 41: 1787-1797.

6. Al-Masri MR (1999) *In vitro* digestible energy of some agricultural residues, as in fluency by gamma irradiation and sodium hydroxide. Applied Radiation and Isotopes. 50: 295-301.

7. Al-Masri MR (2005) Nutritive value of some agricultural wastes as affected by relatively low gamma irradiation levels and chemical treatments. Bioresoure Technology. 96: 1737-1741.

8. ASTM (1984) Method for using the Fricke dosimeter to measure absorbed dose in water. ASTM Standard E 1026.

9. Blummel M and Orskov ER (1993) Composition of *in vitro* gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting food intake in cattle. Animal Feed Science and Technology. 40: 109-119.

10. Blummel M, Makkar HPS and Becker K (1997) *In vitro* gas production: a technique revisited. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 77: 24-34.

11. Broderick GA and Kang JH (1980) Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and *in vitro* media. Journal of Dairy Science. 63: 64-75.

12. Chaji M, Mohmmadabdi T, Mamouei M and Tabatabaei S (2010) The effect of processing with high steam and sodium hydroxide on nutritive value of sugarcane pith by *in vitro* gas production. Journal of Animal and Veterinary Advances. 9: 1015-1018.

13. Chaudhry AS (1998) Nutrient composition, digestion and rumen fermentation in sheep of wheat straw treated with calcium oxide, sodium hydroxide and alkaline hydrogen peroxide. Animal Feed Science and Technology. 74: 315-328.

14. Chaudhry AS (2000) Rumen degradation *in sacco* in sheep of wheat straw treated with calcium oxide, sodium hydroxide and sodium hydroxide plus hydrogen peroxide. Animal Feed Science and Technology. 83: 313-323.

15. Dewhurst RJ, Hepper D and Webster AJF (1995) Comparison of *in sacco* and *in vitro* techniques for estimating the rate and extent of rumen fermentation of a range of dietary ingredients. Animal Feed Science and Technology. 51: 211-229.

16. Driscoll M, Stipanovic A, Winter W, Cheng K, Manning M, Spiese J, Galloway RA and Cleland MR (2009) Electron beam irradiation of cellulose. Journal of Radiation Physics and Chemistry. 78: 539-542.

17. Haddi ML, Filacorda S, Meniai K, Rollin F and Susmel P (2003) *In vitro* fermentation kinetics of some halophyte shrubs sampled at three stage maturity. Animal Feed Science of Technology. 104: 215-225.

18. Khorvash M, Kargar S, Yalchi T and Ghorbani GR (2010) Effects of calcium oxide and calcium hydroxide on the chemical composition and *in vitro* digestibility of soybean straw. Journal of Food, Agriculture and Environment. 8: 356-359.

19. Maheri-Sis N, Abdollahi-Zive B, Salamatdoustnobar R, Ahmadzadeh AR, Aghajanzadeh-Golshani A and Mohebbizadeh M (2011) Determining nutritive value of soybean straw for ruminants using naylon bags technique. Pakistan Journal of Nutrition. 10: 838-841.

20. Makkar HPS, Blummel M and Becker K (1995) Formation of complexes between polyvinyl pyrrolidones or polyethylene glycols and

tannins, and their implication in gas production and true digestibility in *in vitro* techniques. British Journal of Nutrition. 73: 897-913.

21. Menke KH and Steingass H (1988) Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. Animal Research and Development. 28: 7-55.

22. Menke KH, Raab L, Salewski A, Steingass H, Fritz D and Schneider W (1979) The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. Journal of Agricultural Science. 92: 217-222.

23. Ørskov ER and McDonald I (1979) The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rumen rate of passage. Journal of Agricultural Science. 92: 499-503.

24. Owen E, Klopfenstan T and Urio NA (1984) Treatment with other chemicals in straw and other fibrous by-product as feed. Sundstol and Owen ed. Elsevier Science publishers, Amsterdam. Pp. 248-273.

25. SAS (2003) SAS User's Guide: Statistics, Version 9.1 Edition. SAS Institute, Cary, NC, USA.

26. Selim ASM, Pan J, Takano T, Suzuki T, Koike S, Kobayashi Y and Tanaka K (2004) Effect of ammonia treatment on physical strength of rice straw, distribution of straw particles and particle associated bacteria in sheep rumen. Animal Feed Science and Technology. 115: 117-128.

27. Sommart K, Parker DS, Rowlinson P and Wanapat M (2000) Fermentation characteristics and microbial protein synthesis in an *in vitro* system using Cassava, Rice straw and dried Ruzi grass as substrates. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. 13: 1084-1093.

28. Tang SX, Wang KQ, Cong ZH, Wang M, Han XF, Zhou CS, Tan ZL and Sun ZH (2012) Changes in chemical composition and *in vitro* fermentation characters of rice straw due to gamma irradiation. Journal of Food and Agriculture and Environment. 10: 459-462.

29. Trach NX, Mo M and Xuan Dan C (2001) Effects of treatment of rice straw with lime and/or urea on its chemical composition, *in vitro* gas production and *in sacco* degradation characteristics. Livestock Research for Rural Development. 13: 117-134.

30 . Van Soest PJ (1994) Nutritional Ecology of the Ruminant. Cornel University Press, Ithaca, New York. P. 374.