

اثرات زیست‌محیطی و مزایای اقتصادی چرخه مدیریت کود دامی با تولید بیوگاز در مزارع صنعتی پرورش گاو

شیری

پریا سفیدپری^۱، شاهین رفیعی^{۲*}، محمد شریفی^۳، بشیر عباسی دشتکی^۴، نیون ولینگا^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری

کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳. استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۵. محقق ارشد، گروه علوم دامی و محیط زیست، دانشگاه و مرکز تحقیقاتی واخنینگن، هلند

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۴)

چکیده

چرخه مدیریت کود دامی از مرحله جمع‌آوری تا کاربرد در مزرعه در پرورش گاو شیری برای سناریوهای مختلف از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور ترکیب کود در این چرخه با توجه به جیره مصرفی دام تعیین گردید. اثرات زیست‌محیطی به کمک استانداردها و سودمندی اقتصادی هر سناریو با نرم‌افزار کامفار محاسبه شد. نتایج این تحقیق حاکی از سودمند بودن احداث نیروگاه بیوگاز علی‌رغم نیاز آن به سرمایه‌گذاری اولیه بالا در حدود ۱۲۵ میلیارد ریال می‌باشد که دارای دوره برگشت سرمایه در حدود ۳-۴ سال است. میانگین نرخ بازده داخلی این پروژه ۲۴٪ با نرخ تنزیل ۲۰٪ محاسبه شد. نرخ بازده داخلی نشان می‌دهد این سرمایه‌گذاری ریسک‌پذیر بوده اما از درآمد مناسبی برخوردار خواهد بود. در سناریوی ۴ با فرآوری لجن هاضم به کمک جداکننده مکانیکی و کمپوست بیشترین میزان کاهش در انتشار متان ($-261 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ m}^{-3}$) مشاهده شد. سناریو ۲ و ۴ به ترتیب ۳۶٪ و ۱۷٪ کاهش در تولید آلاینده‌ها داشتند. جداسازی بخش مایع و جامد و ماسه از کود تأثیر ناچیزی در کاهش آلاینده‌ها داشته اما دارای مزایای اقتصادی می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق، تولید سوخت بیوگاز باعث کاهش مقادیر زیادی گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های آب و خاک می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، اثرات زیست‌محیطی، سودآوری اقتصادی، پرورش گاو شیری، کود دامی

مقدمه

منابع تجدیدپذیر انرژی نظیر استحصال انرژی از کود دامی و تولید بیوگاز گام بردارد. در بسیاری از کشورها نیز قوانین و مقررات جدیدی مبنی بر مدیریت ضایعات بالاخص ضایعات بخش کشاورزی و محیط زیست در راستای جایگزینی با منابع شیمیایی وضع شده است که در اغلب موارد اجرای این‌گونه سیاست‌ها با جدیت دنبال می‌گردد (Torquati et al., 2014). مدیریت صحیح کود دامی از مرحله جمع‌آوری، فرآوری و پخش در مزرعه مزایای بسیاری را برای واحد گاوداری خواهد داشت؛ از جمله این مزایا می‌توان به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و فواید اقتصادی برای واحد گاوداری اشاره کرد (Aguirre- Villegas and Larson, 2017).

کود دامی یکی از منابع لازم در تأمین عناصر غذایی خاک در تولید غذا محسوب می‌شود. مدیریت کود دامی می‌بایست در جهت انجام شود که بتوان از کود دامی به عنوان کود ارگانیک در چرخه تولید غذا استفاده نمود. در اینصورت استفاده بهینه از کود با حداقل تلفات عناصر غذایی آن با مدیریت صحیح و انتخاب روش‌های صحیح فرآوری کود نظیر جداسازی میسر است.

امروزه اهمیت کاهش اثرات مخرب منابع انرژی بر پایه سوخت‌های فسیلی موجب شده است که بشر به سمت توسعه

خواهد داشت. همچنین نتایج این مطالعه وابستگی بیشتر تولید متان را به دمای محیط نشان داد (Sommer *et al.*, 2004). مدل جامع دیگری به نام FarmGHG، به منظور محاسبه کمی جریان کربن و نیتروژن و اثر تصمیمات مدیریتی در کاهش آلاینده‌گی گازهای گلخانه‌ای در گاوداری‌ها با در نظر گرفتن کلیه فعالیت‌های دامپروری در داخل و خارج از مزرعه طراحی شد. نتایج این مدل نشان داد آلاینده‌گی در سطح مزرعه به مازاد نیتروژن و بازده بازیافت نیتروژن بستگی دارد (Olesen *et al.*, 2004). اثر استراتژی‌های مختلف در چرخه کامل یک واحد دامپروری در کاهش آلاینده‌گی کود دامی در مطالعه دیگری بررسی شد. در این تحقیق، خوراک دام نقش مهمی در جریان عناصر غذایی در مزرعه دامپروری دارد؛ به این مفهوم که جیره غذایی اثر مستقیمی بر روی ترکیب کود می‌گذارد. همچنین مدل‌های ارزیابی چرخه کامل کود در ارزیابی جریان عناصر غذایی، مصرف انرژی و هزینه‌های واحد دامپروری بسیار سودمند گزارش شدند (Petersen *et al.*, 2007). مدل تجربی DairyWise به منظور پیش‌بینی رابطه بین نیتروژن مازاد و تولید گازهای آلاینده در واحد پرورش گاو شیری در سال ۲۰۰۷ ارائه شد. در این مدل جامع، میزان مازاد نیتروژن در شبیه‌سازی فعالیت‌های کلی مزرعه از نظر فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی مؤثر است. همچنین مدیریت دامپروری از جنبه‌های گوناگون شامل چرخه نیتروژن و فسفر، آبشویی عناصر کود، تولید آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و مسایل مالی واحد شبیه‌سازی می‌شود. نتایج نهایی شامل نقشه راهی برای مزرعه با توجه به جریان عناصر و اثر آن‌را بر روی مسایل عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی مزرعه است (Schils *et al.*, 2007). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷، مدلی جهت ارزیابی زیست‌محیطی استراتژی‌های مختلف کود دامی در فرآیند تولید بیوگاز با در نظر گرفتن چرخه تولید نیتروژن و کربن و به کمک ارزیابی چرخه حیات توسعه داده شد. در این مطالعه اثر فرآوری کود با تولید بیوگاز و اثر آن در کاهش تولید گاز آلاینده متان (۰.۷۵٪) و همچنین بهبود کیفیت کود تولیدی حاصل از لجن هاضم (۰.۱۵٪) در شرایط مختلف دما، روش بی‌هوازی و تکنولوژی مورد مطالعه قرار گرفت (Pardo *et al.*, 2017).

براساس مرور منابع انجام شده و با توجه به سهم بخش گاوداری در تولید گازهای گلخانه‌ای، لازم است مدیریت کود دامی از لحاظ اثرات زیست‌محیطی و فواید اقتصادی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد. یکی از تفاوت‌های اصولی تحقیق حاضر با تحقیقات دیگر، بررسی این چرخه از سه جنبه فنی،

کاهش بو و پاتوژن‌ها دارای مزایای دیگری چون فواید زیست محیطی نظیر کاهش انتشار گاز متان (CH_4) موجود در کود دامی در طی ذخیره آن و یا پس از پخش در مزرعه است (Holm-Nielsen *et al.*, 2009). این میزان متان که با تجزیه مواد ارگانیک تولید می‌شود در صورت انباشت و ذخیره کود به اتمسفر منتقل خواهد شد (Iglinski *et al.*, 2012).

تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر متان (CH_4)، کربن دی‌اکسید (CO_2) و دی نیتروژن منوکسید (N_2O) در نتیجه فعالیت‌های انسانی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Lelieveld *et al.*, 1998; Dentener and Raes, 2002). این گازها می‌تواند از منابع مختلفی چون محل شیردوشی، محیط نگهداری دام و یا توده کود دامی انبار شده وارد اتمسفر شود. مطالعات حاکی از سهم ۳۶٪ تولید گاز متان در بخش دامپروری است (Hogan *et al.*, 1991; Lelieveld *et al.*, 1998). انتشار متان در نتیجه مدیریت کود دامی دومین عامل آلاینده‌گی پس از تخمیر روده‌ای در گاوها می‌باشد (Aguirre-Villegas and Larson, 2017).

هر واحد دامپروری مجزا از واحدهای دیگر مدیریت می‌شود. در حالی‌که هر مدیر در راستای دستیابی به اهداف مجموعه تصمیم‌گیری می‌نماید. به دلیل تفاوت در اهداف هر واحد دامپروری، تصمیمات اتخاذ شده جهت مدیریت کود نیز متفاوت از واحدهای دیگر است. از سوی دیگر، گاوداری یک مجموعه از اجزای به هم وابسته نظیر خاک، محصولات کشاورزی، خوراک دام، دام‌ها و کود دامی است. مدل‌سازی تعادل عناصر غذایی و جریان آن به داخل و خارج از چرخه مدیریت کود موضوعی است که تا به حال توسط محققان در نقاط مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفته است (Sommer *et al.*, 2004; Sommer *et al.*, 2006; Petersen *et al.*, 2007; Oenema *et al.*, 2007; Leip *et al.*, 2011; Leip *et al.*, 2014; Pardo *et al.*, 2017; Schils *et al.*, 2007; Olesen *et al.*, 2004).

مدلسازی دینامیک جریان کربن و نیتروژن در طی مراحل جمع‌آوری و استعمال کود مایع (کود نیمه جامد) با احتساب تولید گازهای آلاینده CH_4 و N_2O در تحقیقی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مدل عواملی چون ماده فرار (VS)، دما، مدت زمان ذخیره کود و میزان نیتروژن در نظر گرفته شده است. این مدل نشان داد که تولید بیوگاز و هضم بی‌هوازی با تجزیه مواد آلی و تغییر ماده فرار کود انجام می‌شود. براین اساس، ۹۰٪ کاهش در تولید CH_4 از محل ذخیره کود دامی و ۵۰٪ کاهش در تولید N_2O پس از پخش کود ارگانیک حاصل از این فرآیند در فصل بهار در مقایسه با کود فرآوری نشده وجود

رایانه‌ای تعیین می‌شود.

مواد و روش‌ها

توصیف مشخصات واحد مورد مطالعه و مرز سامانه مورد ارزیابی

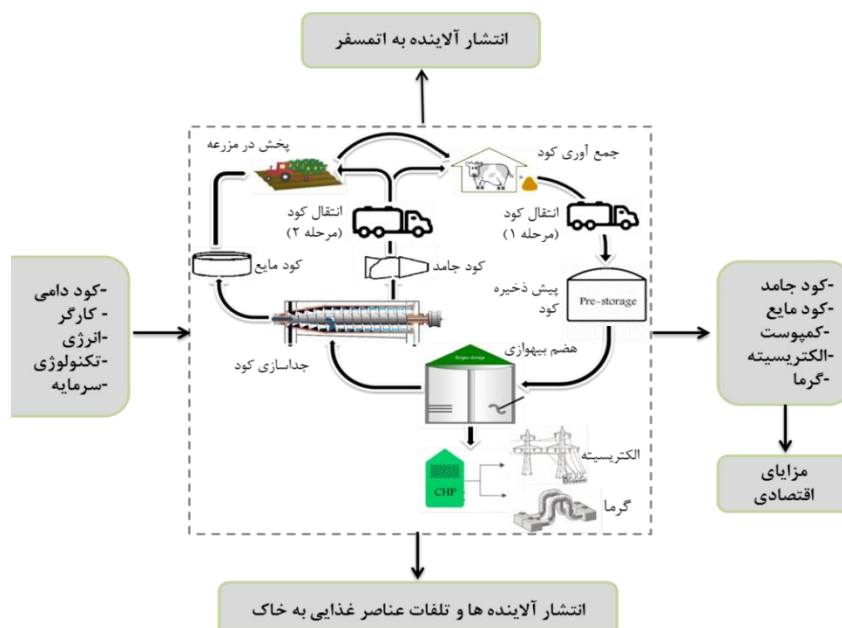
به منظور ارزیابی روش‌های مختلف مدیریت کود در واحد بزرگ مقیاس پرورش گاو شیری، ابتدا اطلاعات پایه از واحد دامداری جمع‌آوری گردید. مشخصات این دامداری در جدول ۱ خلاصه شده است.

به توجه به شکل ۱ مرزهای سامانه مدیریت کود مورد ارزیابی تعیین، سپس مشخصات کود پس از دفع تخمین و با توجه به مراحل مختلف فرآوری میزان تلفات هر بخش را با آلاینده‌ها محاسبه شدند.

زیست‌محیطی و اقتصادی است. اگرچه اندازه‌گیری و کمی نمودن این فواید چندان ساده نمی‌باشد اما می‌توان کیفیت اولیه کود دامی را از نظر عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) و مواد ارگانیک بر پایه مشخصات خوراک مصرفی دام، مشخصات فیزیکی گاوها و میزان شیر تولیدی تخمین زده و سپس به محاسبه تغییرات کیفیت کود در نتیجه فرآوری آن با روش‌های گوناگون نظیر جداسازی بخش جامد و مایع، هضم بی‌هوازی، کمپوست کردن و غیره پرداخت. هدف از تحقیق حاضر این است که با بررسی دقیق، تمامی منابع تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای را شناسایی و مقدار آلاینده‌گی و تلفات هر بخش را با استفاده از مدل‌های موجود در تحقیقات پیشین و همچنین دستورالعمل‌های IPCC تعیین نمود. همچنین مزایای اقتصادی مدیریت کود دامی در سناریوهای مختلف با استفاده از مدل‌های

جدول ۱. مشخصات و فرضیات مطالعه موردی

نژاد	هلشتاین	نوع جایگاه نگهداری	جایگاه انفرادی (فری‌استال) / بهار بند
تعداد دام (کل)	۶۰۹۲ رأس	مواد بستر	ماسه / ضایعات ارگانیک
تعداد دام (شیرده)	۴۵۰۰ رأس	روش جمع‌آوری کود	لودر / کودروب
متوسط روزانه شیر تولیدی	۴۰ کیلوگرم/رأس	روش حمل‌ونقل کود	کامیون / کودروب (انتقال اولیه)
درصد چربی	۳/۲٪	فاصله تا سایت جمع‌آوری کود	۱ کیلومتر
درصد پروتئین	۲/۷٪	فاصله تا زمین کشاورزی	۳۰ کیلومتر
وزن زنده-گاو شیرده و خشک	۶۸۰ کیلوگرم/رأس	روش ذخیره کود مایع	گودال طبیعی
وزن زنده-گوساله و تلیسه	۵۱۵ کیلوگرم/رأس	ابعاد مخزن کود مایع	۱۰*۱۰*۹۰ متر
سن اولین زایش	۲/۰۸ سال	روش ذخیره کود جامد	پشته
نرخ باروری	۰/۹۵	ابعاد پشته کود جامد	۴*۴*۱۲ متر



شکل ۱. مرز سامانه مدیریت کود در واحد گاوداری بزرگ مقیاس

سناریوهای ارزیابی شده

سناریوهای ارزیابی شده در این تحقیق به منظور بررسی اثرات تولید بیوگاز بر انتشار آلاینده‌ها و فواید اقتصادی آن در جدول ۲ آمده است.

سناریو ۱ وضعیت موجود واحد گاو‌داری از نظر مدیریت کود می‌باشد. در این سناریو پس از مرحله جمع‌آوری، بخشی از کود (۵۰٪) با توجه به ظرفیت سپراتور (جداکننده) به دو بخش

جامد و مایع تبدیل و بخش دیگر کمپوست می‌شود (۵۰٪). بخش مایع پس از تصفیه به سیستم آبیاری وارد می‌شود. در این مطالعه از بررسی بخش تصفیه صرف‌نظر شده است. در سناریو ۲ الی ۴ کاربرد هاضم بی‌هوازی درون مزرعه‌ای و یکی از روش‌های فرآوری کود (جداسازی مایع و جامد و کمپوست در سناریو ۲ و ۳) و کاربرد هر دو روش فرآوری لجن هاضم در سناریو ۴ بررسی شده است.

جدول ۲. سناریوهای مورد بررسی این تحقیق

فعالیت‌های مدیریت کود	سناریو ۱ (فعالی) (Sc. 1)	سناریو ۲ (آینده) (Sc. 2)	سناریو ۳ (آینده) (Sc. 3)	سناریو ۴ (آینده) (Sc. 4)
جمع‌آوری	✓	✓	✓	✓
انتقال ۱	✓	✓	✓	✓
جداسازی ماسه ^۱	✓	✓	✓	✓
هضم بی‌هوازی ^۲	✓	✓	✓	✓
جداسازی مکانیکی ^۳	✓	✓	✓	✓
کمپوست کردن ^۴	✓	✓	✓	✓
ذخیره-۲	✓	✓	✓	✓
انتقال-۲	✓	✓	✓	✓

^۱ جداکننده مکانیکی ماسه با دو بازده ۸۷٪ (سناریو ۱) و ۹۵٪ (سناریو ۲ الی ۴) فرآیند هضم پیوسته مزوفیلیک با زمان ماند ۲۶ روز

^۲ جداکننده ماریپچ فشاری ^۴ کمپوست کردن فعال بر روی خاک توسط لودر

تعیین ترکیب کود در دامداری مورد مطالعه

در این تحقیق از روش محاسبه ترکیب کود با توجه به جیره دام استفاده گردید. برای این منظور از دستورالعمل IPCC(2006a)، مدل (Opio et al., 2013) GLEAM و NRC (1998) بهره گرفته شد. در نتیجه مقدار نیتروژن (N) دریافتی از طریق خوراک دام از فرمول زیر محاسبه می‌شود (IPCC, 2006a):

$$N_{intake} = GE/GE_{feed} \times (CP/6.25)/100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن N_{intake} نیتروژن روزانه دریافتی ($kg N day^{-1}$)، GE انرژی ناخالص حیوان ($MJ day^{-1}$)، GE_{feed} انرژی ناخالص جیره در هر کیلوگرم ماده خشک ($MJ kg^{-1}$) و CP محتوای پروتئین خام جیره ($g kg^{-1}$) (جدول ۳) است. انرژی ناخالص حیوان به کمک مدل GLEAM و بر پایه روابط NRC محاسبه شد. فسفر و پتاسیم دریافتی نیز با توجه به مشخصات اقلام خوراک مصرفی در جدول ۴ و میزان هر یک در جیره تعیین گردید.

جدول ۳. مشخصات خوراک مصرفی دام^۱

اقلام جیره	ماده خشک (DM) گرم/کیلوگرم	قابلیت هضم (DE) %	پروتئین خام (CP) گرم/کیلوگرم	انرژی ناخالص (GE _{feed}) مگاژول/کیلوگرم	فسفر (P) گرم/کیلوگرم	پتاسیم (K) گرم/کیلوگرم	سدیم (Na) گرم/کیلوگرم
کنسانتره ^۲	۸۹۴	۸۰/۹۴	۱۵۷/۷۲	۱۶/۱	۶/۸۹	۱۰	۰/۲
سیلو	۳۷۰	۷۱/۹	۱۸۶	۱۹/۱	۱/۷	۱۰/۴	۰/۱
یونجه	۸۹۴	۶۱/۸	۲۰۳/۵۸	۱۸/۲	۲/۶	۲۴/۶	۰/۲
کاه گندم	۹۱۰	۴۸/۴	۴۶/۱۵	۱۸/۵	۰/۷	۱۱/۲	۰/۱
کنجاله پنبه	۹۲۲	۸۱/۷	۴۹	۲۱/۲	۱۲/۴۰	۱۶/۶۰	۰/۹
ملاس	۷۳۰	۷۹/۷	۷۵/۳۴	۱۴/۷	۰/۷	۵۱	۲/۴
بذر پنبه	۹۲۳	۶۲/۸	۲۳۶/۱۸	۲۳/۸	۵/۹	۱۲	۰/۱

^۱ Feedipedia, 2017

^۲ آمار واقعی مربوط به مشخصات خوراک کنسانتره

$$VS_{nd} = VS - VS_d \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه (۵)، VS ، GE_{feed} ، $DE\%$ ، GE_{UE} و ASH به ترتیب عبارتند از مقدار ماده فرار کود براساس ماده خشک (DM) ($kg VS animal^{-1} day^{-1}$) (جدول ۴)، انرژی ناخالص خوراک ($MJ kg^{-1}$)، قابلیت هضم اقلام خوراک (%) (جدول ۴)، انرژی موجود در ادرار (نسبتی از انرژی ناخالص = $0.4 * 0.4$) انرژی ناخالص برای بیشتر دام‌ها)، انرژی ناخالص حیوان ($MJ day^{-1}$) و مقدار خاکستر (ASH) کود (۰/۰۸ برای گاو). در رابطه (۶)، VS_d ماده فرار تجزیه‌پذیر ($kg VS animal^{-1} day^{-1}$)، E_{CH4act} مقدار واقعی قابلیت متان‌زایی کود ($VS g CH_4 kg^{-1}$) (۰/۲) و E_{CH4pot} پتانسیل متان‌زایی کود ($VS g CH_4 kg^{-1}$) (۰/۴۸) است. همچنین VS_{nd} ماده فرار تجزیه‌ناپذیر می‌باشد.

ارزیابی زیست محیطی چرخه مدیریت کود

برای محاسبه آلاینده‌گی روش‌های مختلف مدیریت کود سه مرحله طی شد: (۱) اطلاعات پایه نظیر روش جمع‌آوری، انتقال، توان ماشین‌ها و تجهیزات گردآوری شد. (۲) شاخص‌های آلاینده‌گی و روابط ریاضی جهت محاسبه انتشار آلاینده‌ها از منابع، دستورالعمل‌ها و مطالعات مشابه استخراج گردید. (۳) مقدار آلاینده‌گی در مراحل مختلف چرخه شکل ۱ محاسبه و تعیین شد. در این تحقیق کلیه مراحل فرآوری کود از زمان دفع تا انتقال به مزرعه از نظر تولید آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و سوخت‌های فسیلی بررسی و محاسبه شدند. جزئیات مربوط به روش محاسبه در روابط ۱۰ الی ۱۷ ارائه شده است. در مرحله جمع‌آوری، تولید متان به نوع جایگاه نگهداری دام بستگی دارد؛ در جایگاه‌های انفرادی (فری‌استال) دما و مساحتی از سالن که آغشته به کود است از عوامل مؤثر محسوب می‌شوند؛ درحالی‌که در بهاربندها دما عامل تعیین‌کننده میزان تولید متان است (Rotz *et al.*, 2016). انتشار دی‌نیتروژن منوکسید (N_2O) و آمونیاک (NH_3) به مقدار نیتروژن موجود در کود بستگی دارد. منظور از نیتروژن کود، فرم معدنی آن (نیتروژن موجود در ادرار) است که به محتوای آمونیوم کود (TAN) بستگی دارد. TAN طبق تعریف معادل مجموع نیتروژن موجود در ادرار و نیتروژن معدنی شده در مدفوع است که از روابط (۸) و (۹) محاسبه شد. بخش غیرقابل هضم پروتئین جیره نیتروژن مدفوع را تشکیل می‌دهد و مابقی نیتروژن ادرار را تشکیل می‌دهد (Vonk *et al.*, 2016). بنابراین می‌توان به اثر عناصر غذایی موجود در خوراک دام بر روی کیفیت کود دامی پی برد.

$$TAN (N_{urine}) = (N_{tot} - N_{dung}) + (N_{mineralization} \times N_{tot}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

به طور کلی میزان عناصر غذایی در کود دفع شده از کسر عناصر غذایی موجود در خوراک دام از میزان عناصر غذایی جذب شده در بافت حیوان و همچنین شیر بدست می‌آید. با بهره‌گیری از روش‌های موجود در منابع ذکر شده، مقدار عناصر دریافتی محاسبه شد. همچنین از روابط (۲) الی (۴)، میزان نیتروژن جذب محاسبه و مقدار فسفر، پتاسیم موجود در کود (دفع عنصر از طریق ادرار و مدفوع دام) (جدول ۴) تعیین گردید (IPCC, 2006a).

(رابطه ۲)

عناصر جذبی در بافت و شیر - عناصر دریافتی در خوراک دام = میزان عناصر دفعی

$$NE_g = 22.02 \times \left(\frac{BW}{C_g \times MW} \right)^{0.75} \times WG^{1.97} \quad (\text{رابطه ۳})$$

(رابطه ۴)

$$N_{retention} = [Milk \times (Milk P\%/100)/6.38] + [WG \times [268 - (7.03 \times \frac{NE_g}{WG})]/6.25]$$

$N_{retention}$ ، Milk P%، Milk و NE_g به ترتیب میزان نیتروژن روزانه ($kg N animal^{-1} day^{-1}$)، شیر تولیدی (kg $animal^{-1} day^{-1}$)، درصد پروتئین شیر (%، افزایش وزن (kg day^{-1}) و انرژی خالص برای افزایش وزن ($MJ day^{-1}$) است. انرژی لازم برای افزایش وزن (NE_g) از رابطه (۳) محاسبه شد. لازم به توضیح است، NE_g برای گروه‌های گاو شیری و گاو خشک صفر در نظر گرفته شد (Opio *et al.*, 2013). مقدار جذب عناصر فسفر و پتاسیم در بافت و شیر تولیدی نیز به کمک ضرایب تبدیل ارائه شده در جدول ۴ تعیین گردید. جدول ۴. فسفر (P) و پتاسیم (K) در بافت گوشت و شیر گاو شیری با وزن ۶۰۰ کیلوگرم (WUM, 2009)

نوع جذب	فسفر	پتاسیم
عنصر جذبی در شیر	۱	۱/۶
عنصر جذبی در بافت	۷/۴	۲

مقدار ماده فرار (VS) در کود یکی از مشخصات مهم در تعیین پتانسیل تجزیه مواد آلی کود و تبدیل آن به متان است. بنابراین مقدار VS بیان‌کننده مقدار ماده ارگانیک کود است که در دو نوع تجزیه‌پذیر و تجزیه‌ناپذیر موجود می‌باشد و به کمک روابط (۵) الی (۷) محاسبه شد (IPCC, 2006؛ Sommer *et al.*, 2004).

(رابطه ۵)

$$VS = [GE_{feed} \times (1 - DE\%/100) + (UE \times GE)] \times [(1 - ASH/18.45)]$$

$$VS_d = VS \frac{E_{CH4act}}{E_{CH4pot}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

است (Vonk et al., 2016).

مقدار نیتروژن اکسید به مقدار نیتروژن کل در کود وابسته است که از رابطه (۱۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$NO_x \text{ emission} = N_{tot} \times EF_{NO_x} \times \frac{30}{14} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$NO_x \text{ emission}$ عبارت است از آلاینده‌ی نیتروژن اکسیدها، EF_{NO_x} برابر با شاخص آلاینده‌ی NO_x ($kg \text{ NO}_x\text{-N } kg \text{ N}^{-1}$) و $30/14$ ضریب تبدیل $NO_x\text{-N}$ به NO_x است (Vonk et al., 2016; IPCC, 2006a).

مقدار تولید متان در جایگاه نگهداری با توجه به نوع جایگاه از روابط ذیل محاسبه می‌شود:

$$E_{CH_4 \text{ floor-free stall}} = \max(0, 0.13 * T) * A_{barn} / 1000 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$CH_4 \text{ floor-free stall}$ بیانگر میزان انتشار متان در فری استال ($kg \text{ CH}_4 \text{ day}^{-1}$)، T برابر دمای محیط ($^{\circ}C$) و A_{barn} مساحتی از جایگاه نگهداری در تماس با کود (m^2) می‌باشد (Chianese et al., 2009).

$$E_{CH_4 \text{ floor-loose housing}} = VS (B_o) (0.67) MCF \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$E_{CH_4 \text{ floor-loose housing}}$ عبارت است از میزان انتشار متان در بهار بند ($kg \text{ CH}_4 \text{ day}^{-1}$)، VS برابر ماده فرار کود ($kg \text{ VS}$)، B_o بیانگر قابلیت متان‌زایی کود و برابر $0.24 m^3 \text{ kg VS}^{-1}$ ، 0.67 چگالی متان ($kg \text{ m}^{-3}$) و MCF برابر با شاخص تبدیل متان (متغیر بین یک تا دو درصد) می‌باشد (IPCC, 2006a).

تولید ذرات معلق هوا تنها در جایگاه نگهداری دام قابل توجه می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$PM_{emission} = EF_{PM_{2.5/10}} \times housing \text{ share} \times No. \text{ of animals} / 1000 \times 365 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که در آن $PM_{emissions}$ انتشار ذرات معلق در جایگاه دام ($kg \text{ PM animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$) و $EF_{PM_{2.5/10}}$ برابر شاخص آلاینده‌ی $PM_{2.5/10}$ (جدول ۵) است (Vonk et al., 2016). ترکیب کود دامی در مرحله جمع‌آوری متأثر از مواد بستر دام نیز می‌باشد. جداسازی ماسه در دامداری‌هایی که از ماسه برای بستر دام استفاده می‌کنند الزامی است؛ چرا که هاضم‌های بی‌هوایی در معرض ته‌نشینی ماسه خواهند بود. همچنین تجهیزات فرآوری کود نظیر جداکننده مکانیکی نیازمند تعمیرات مداوم شده و سریعتر فرسوده می‌شوند. از سوی دیگر ماسه بازیافت‌شده پس از جداسازی قابلیت استفاده مجدد را به عنوان بستر دام داشته و از میزان استخراج از معادن ماسه می‌کاهد (Wedel, 2012). در این مطالعه، جداکننده مکانیکی ماسه

که در آن TAN محتوای آمونیوم کود ($kg \text{ farm}^{-1} \text{ day}^{-1}$)، $N_{mineralization}$ برابر با درصد معدنی‌شدن نیتروژن ارگانیک ($\%$) (۱۰٪ از نیتروژن ارگانیک موجود در کود)، N_{tot} کل نیتروژن دفع‌شده ($kg \text{ farm}^{-1} \text{ day}^{-1}$) و N_{dung} از رابطه (۹) محاسبه شده است (Vonk et al., 2016):

$$N_{dung} = N_{tot} * (100 - DE) / 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن N_{dung} میزان نیتروژن در مدفوع گاو ($kg \text{ farm}^{-1} \text{ day}^{-1}$)، N_{tot} کل نیتروژن دفع‌شده ($kg \text{ farm}^{-1} \text{ day}^{-1}$) است (Vonk et al., 2016).

مقدار آمونیاک تولیدی از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (Vonk et al., 2016):

$$NH_3\text{-emission} = (TAN + N_{org} * N_{mineralization}) * N_{tot} * housing \text{ share} * EF_{NH_3} * 17/14 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$NH_3 \text{ emission}$ عبارت است از آلاینده‌ی آمونیاک ($kg \text{ NH}_3 \text{ day}^{-1}$)، N_{org} نیتروژن ارگانیک ($I-TAN$)، $N_{mineralization}$ درصدی از N_{org} که معدنی می‌شود ($\%$)، $Housing \text{ share}$ سهم نوع جایگاه نگهداری، EF_{NH_3} شاخص آلاینده‌ی آمونیاک ($kg \text{ NH}_3$ TAN % ۱۲/۶۷)، $17/14$ ضریب تبدیل $NH_3\text{-N}$ به NH_3 براساس جرم مولی است (Vonk et al., 2016).

گاز گلخانه‌ای N_2O به دو شکل مستقیم و غیر مستقیم تولید می‌شود و از مجموع آن‌ها می‌توان کل تولید N_2O را تخمین زد. روابط (۱۱) الی (۱۳) به ترتیب N_2O کل، مستقیم و غیرمستقیم را نمایش می‌دهد:

$$N_2O_{emissions} = (N_2O_{direct} + N_2O_{indirect}) * 44/28 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

N_2O_{direct} بیانگر آلاینده‌ی N_2O مستقیم ($kg \text{ N}_2O \text{ day}^{-1}$)، $N_2O_{indirect}$ بیانگر آلاینده‌ی N_2O غیرمستقیم ($kg \text{ N}_2O\text{-N } \text{day}^{-1}$) و $44/28$ برابر ضریب تبدیل $N_2O\text{-N}$ به N_2O است (Vonk et al., 2016).

$$N_2O - N_{emissions-direct} = N_{tot} * EF_{N_2O \text{ direct}} * MMS \text{ share} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

N_{tot} برابر با کل نیتروژن موجود در کود، $EF_{N_2O \text{ direct}}$ بیانگر شاخص آلاینده‌ی N_2O ($kg \text{ N}_2O\text{-N } kg \text{ N}^{-1}$) و $MMS \text{ Share}$ سهم روش مدیریت کود ($\%$) است (Vonk et al., 2016; IPCC, 2006a).

(رابطه ۱۳)

$N_2O_{emission-indirect} = (NH_3 \text{ emission} + NO_x \text{ emission}) * EF_{N_2O \text{ indirect}}$ NH_3 بیانگر میزان آمونیاک ($kg \text{ NH}_3 \text{ farm}^{-1} \text{ day}^{-1}$)، NO_x برابر با آلاینده‌ی نیتروژن اکسیدها و $EF_{N_2O-indirect}$ برابر شاخص آلاینده‌ی N_2O غیرمستقیم ($0.01 \text{ kg } N_2O\text{-N } kg \text{ N}^{-1}$)

انتشار آلاینده‌ها را در مقایسه با ذخیره همان میزان کود تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد (Amon *et al.*, 2006). همچنین، با تولید الکتریسیته از بیوگاز، از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی جلوگیری می‌شود (Aguirre-Villegas *et al.*, 2015). در این تحقیق، از آلاینده‌گی غیرمستقیم (آلاینده‌گی منتشرشده در فرآیند تولید نهاده‌های سامانه) صرف‌نظر شده است. احتراق بیوگاز در واحد CHP منجر به تولید CO₂ می‌شود که در این تحقیق به دلیل چرخه کوتاه مدت CO₂ در محیط آلاینده محسوب نمی‌شود. در جدول ۶ مشخصات سامانه تولید بیوگاز نشان داده شده است.

پیشنهاد شده با اقتباس از مطالعه Wedel (2012) شامل دو مرحله ماسه‌زدایی با نسبت ۱:۱ آب و کود است که ماسه را به راحتی از کود با بازده ۸۷٪ جدا کرده و ته‌نشین می‌شود. همچنین، بازده این سامانه را می‌توان با اضافه نمودن مرحله هیدروسیکلون به ۹۵٪ رسانید که در اینصورت ۵٪ از ماسه وارد هاضم‌ها می‌شود. الکتریسیته منبع فسیلی تأمین انرژی این مرحله می‌باشد (۰/۲۶ kWh m⁻³). شاخص آلاینده‌گی الکتریسیته ۰/۹۱ kg CO_{2-eq} kWh⁻¹ در نظر گرفته شد (Ecoinvent 3.3, 2016).

هضم بی‌هوازی یکی از مراحل تیمار کود است که میزان

جدول ۵. شاخص‌های آلاینده‌گی مواد معلق ۲/۵ و ۱۰ میکرون (Vonk *et al.*, 2016)

نوع جایگاه نگهداری	گاو شیرده و خشک	گوساله و تلیسه
انفرادی (فری استال و تای استال)		
PM 10	۸۰/۸	۰
PM 2.5	۲۲/۳	۰
بهاربند		
PM 10	۱۴۷/۵	۳۷/۷
PM 2.5	۴۰/۶	۱۰/۴

جدول ۶. مشخصات و فرضیات در نظر گرفته شده در مورد هاضم بی‌هوازی (AD)

مشخصات	واحد	مقدار	منبع
ظرفیت الکتریکی CHP	kW _{el}	۹۹۹	فرض شده ^۱
ظرفیت حرارتی CHP	Kw _{th}	۱۰۵۰	فرض شده
الکتریسیته مورد نیاز AD	% of m ³ influent	۶	Julian <i>et al.</i> , 2013; FNR, 2006
نشت متان از تأسیسات بیوگاز	% of biogas	۱	Pardo <i>et al.</i> , 2017; Hou <i>et al.</i> , 2016
نشت متان از CHP	% of biogas	۱/۵	Pardo <i>et al.</i> , 2017; Hou <i>et al.</i> , 2016
ارزش حرارتی پایین متان	MJ/ kg	۵۰	Masters, 2004
بازده تبدیل الکتریکی	%	۳۸	Lansche and Müller, 2012
بازده تبدیل حرارتی	%	۴۶	Lansche and Müller, 2012
انرژی ویژه دیزل	kg ⁻¹ MJ	۴۵/۶	Anonymous, 2017
بازده تبدیل مواد ارگانیک در هاضم	%	۳۵	Møller <i>et al.</i> , 2004
پتانسیل تولید متان	kg CH ₄ kg ⁻¹ VS	۰/۳۵	Møller <i>et al.</i> , 2004
درصد تولید CH ₄ در هاضم	%	۶۵	Jørgensen, 2009
درصد تولید CO ₂ در هاضم	%	۳۵	Jørgensen, 2009
مدت زمان کار CHP	%	۸۵	فرض شده
ظرفیت گرمایی ویژه کود دامی	KJ Kg ⁻¹ °C ⁻¹	۲/۸	Nayyeri <i>et al.</i> , 2009
دمای هاضم (مزوفیلیک)	°C	۳۸	Yu <i>et al.</i> , 2013
درصد ماده جامد (TS) ورودی به هاضم	%	۸	Jørgensen, 2009

^۱ فرض شده در این تحقیق

دارد. جداسازی پسماند هاضم به دو بخش جامد و مایع توسط سپراتور مارپیچ فشاری (Screw Press) که از رایج‌ترین انواع

برای مدیریت پسماند هاضم‌ها گزینه‌های متفاوتی بسته به روش استفاده از کود در مزرعه محصولات کشاورزی وجود

گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. شاخص آلاینده‌گی سوخت دیزل برابر $3/17 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ MJ}^{-1}$ در نظر گرفته شد (Daneshi *et al.*, 2014).

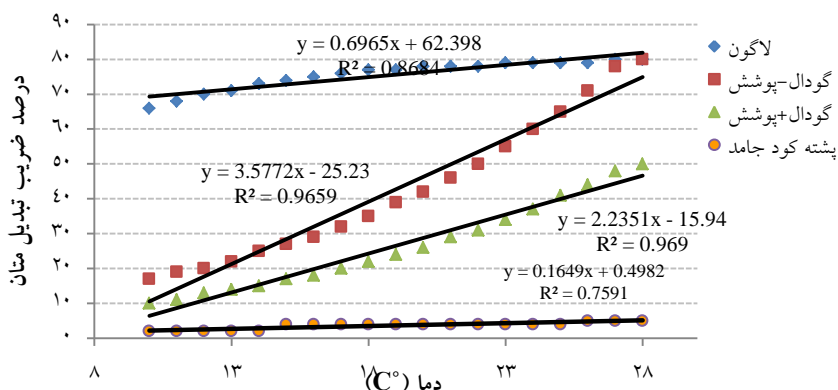
ذخیره کود به صورت مایع و جامد به طور متفاوتی در تولید متان مشارکت دارند. در سطح کود مایع غیرفرآوری شده در مخزن لایه‌ای تشکیل می‌شود که در این حالت تولید N_2O وجود خواهد داشت. در حالی‌که بخش مایع کود بعد از جداسازی تشکیل پوسته نمی‌دهد و N_2O نیز تولید نمی‌شود (Rotz *et al.*, 2016; IPCC, 2006a). تشکیل پوسته اثر مشابهی برای NH_3 دارد. به صورت یک قانون کلی در مخازن نگهداری کود مایع تجزیه کود به صورت بی‌هوازی صورت گرفته و مقدار زیادی متان تولید می‌شود. در مورد کود جامد، تجزیه هوازی بوده و متان کمتری انتشار می‌یابد (IPCC, 2006a). دما، مدت زمان ماندگاری در مخزن و بسته یا باز بودن سطح مخزن در میزان تولید متان مؤثر هستند (Chianese *et al.*, 2009). در این مطالعه از IPCC (2006a) برای تخمین متان تابعی از دما استفاده شد (شکل ۲). در این مطالعه محاسبات مربوط به انتشار گاز متان برای فصول تابستان و زمستان انجام و در نهایت برای گزارش نتیجه نهایی میانگین حسابی دو مقدار لحاظ گردید. شاخص‌های آلاینده‌گی و ضریب تصحیح روش ذخیره کود در جدول ۷ نمایش داده شده است.

سپراتور محسوب می‌شود، از جمله این روش‌ها است. در این روش، بخش مایع پس از تثبیت بیولوژیکی قابلیت استفاده به عنوان کود مایع را دارد. همچنین تصفیه بخش مایع امکان استفاده از آن را در سیستم آبیاری فراهم می‌کند. بخش جامد قابلیت استفاده به صورت کود ارگانیک در مزرعه را دارد. همچنین کمپوست کردن پسماند هاضم و یا بخش جامد جدا شده از دیگر گزینه‌ها است. منبع آلاینده در جداکننده‌های ماریپیچ فشاری، الکتریسیته با میزان مصرف $0/3 \text{ kWhm}^{-3}$ است (Møller *et al.*, 2000). NH_3 و N_2O ، CH_4 از گازهای آلاینده تولیدی در طی کمپوست‌سازی می‌باشند. برای محاسبه متان از دستورالعمل IPCC (2006a) با در نظر گرفتن دو عامل دما و نوع روش کمپوست کردن (فعال، غیرفعال) استفاده شد. شاخص‌های آلاینده‌گی متان (MCF) در مرحله کمپوست‌سازی به روش فعال (زیر و روکردن) برای فصول تابستان و زمستان با متوسط دما به ترتیب 22°C و $7/5^\circ\text{C}$ برابر $0/5$ و 1 انتخاب شد. آنبوی نیترژن در خاک حدود 3 ٪ از نیترژن کل موجود در کود در نظر گرفته شد (Sommer, 2001). انتشار این آلاینده‌ها نه تنها موجب کاهش جذابیت فرآیند کمپوست کردن از نظر زیست‌محیطی می‌شود، بلکه از کیفیت کود در اصلاح خاک نیز می‌کاهد (Hao *et al.*, 2001). سوخت فسیلی دیزل مورد استفاده در تجهیزات برگردان کمپوست نیز از منابع تولید

جدول ۷. شاخص‌های آلاینده‌گی و ضرایب تصحیح روش‌های مختلف ذخیره کود (استخراج شده از منابع مختلف)

عامل آلاینده	شاخص آلاینده‌گی	ضریب تصحیح نوع ذخیره کود	ضریب تصحیح زمان نگهداری کود (ماه) ^e
$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N} \%$	لاگون ^b ، گودال-پوشش ^c ، گودال+پوشش ^c	> 2
$\text{N}_2\text{O-N}$	$\text{NH}_4\text{-N} \%$	پشته-پوشش ^b ، گودال+پوشش ^c	< -4
		پشته+پوشش ^b	2
		گودال-پوشش ^c	1
		گودال+پوشش ^c	1
		پشته کود جامد ^d	$0/8$

^a Rotz (2004), Clemens *et al.* (2006), Misselbrook *et al.* (2014); ^b Rotz (2004), Misselbrook *et al.* (2014), Pardo *et al.* (2017); ^c Amon *et al.* (2006), Pardo *et al.* (2017); ^d Clemens *et al.* (2006), Pardo *et al.* (2017); ^e Petersen *et al.* (1998)



شکل ۲. ضرایب تبدیل متان برای روش‌های مختلف ذخیره کود (IPCC, 2006a)

آبیاری موجب تولید CH_4 و N_2O می‌شود. برای محاسبه آلاینده‌گی این بخش از دستورالعمل (IPCC, 2006b) استفاده شد و شاخص آلاینده‌گی بر حسب اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیائی (BOD) و اکسیژن مورد نیاز شیمیائی (COD) در نظر گرفته شد (جدول ۸).

در واحد گاوداری مورد مطالعه کود جامد به وسیله کامیون به مسافت با شعاع متوسط ۳۰ کیلومتر و کود مایع به شعاع متوسط ۱ کیلومتر پس از تصفیه برای آبیاری استفاده می‌شود. سوخت فسیلی در ماشین‌های حمل کود منبع تولید آلاینده در این مرحله هستند. تخلیه بخش مایع به جوی‌های

جدول ۸. شاخص آلاینده‌گی تخلیه بخش مایع کود سپراتور شده (IPCC, 2006b)

IPCC, 2006b	۰/۱	(-)	تخلیه به آب‌های سطحی، رودخانه و دریاها/ تصفیه نشده
IPCC, 2006b	۰/۶	kg CH_4 /BOD	قابلیت متان‌زایی/تصفیه شده
IPCC, 2006b	۰/۲۵	kg CH_4 /COD	قابلیت متان‌زایی/تصفیه شده
IPCC, 2006b	۰/۰۰۵	kg N_2O -N/kg -N	دی اکسید نیتروژن

این پروژه با فرض مشارکت شرکت‌های خارجی در فناوری تولید بیوگاز استفاده گردید. لذا اطلاعات مربوط به هزینه‌های خارجی سرمایه‌گذاری با استعلام از شرکت‌های سرمایه‌گذار در این پروژه بدست آمد. همچنین سایر اطلاعات لازم در مورد ارزیابی اقتصادی از طرح‌های مشابه و نظر کارشناسان استخراج گردید. برای تعیین ارزش حرارتی حاصل از فرآیند تولید الکتریسیته، قیمت سوخت فسیلی دیزل به عنوان جایگزین آن در نظر گرفته شد. شاخص‌های مالی طرح در این تحقیق از روابط (۱۸) الی (۲۲) محاسبه شدند. ضرایب اقتصادی مورد استفاده در محاسبات نیز در جدول ۹ آمده است.

$$NPV = -I + \sum_{t=0}^n CF_t / (1+r)^t \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

که در آن NPV بیانگر ارزش حال خالص، I هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، CF جریان نقدینگی مورد انتظار در زمان t و r، نرخ تنزیل می‌باشد (Oskounejad, 2016).

$$0 = P_0 + P_1 / (1+IRR) + P_2 / (1+IRR)^2 + \dots + P_n / (1+IRR)^n \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

که در آن IRR نرخ بازده داخلی طرح و P_0, P_1, \dots, P_n برابر جریان‌های نقدی در دوره‌های ۱، ۲، ...، n است (Oskounejad, 2016).

$$BCR = GP / TPC \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

BCR بیانگر نسبت سود- هزینه، GP سود ناخالص و TPC هزینه‌های کل تولید است (Oskounejad, 2016).

$$PBP = TIC / GP \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

PBP برابر با دوره بازگشت سرمایه و TIC هزینه‌های کل سرمایه‌گذاری می‌باشد (Oskounejad, 2016).

$$PI = (TR / (1+r)^n) / TIC \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

که در آن PI بیانگر شاخص سودآوری و TR برابر درآمد کل است (Oskounejad, 2016).

لازم به توضیح است اگرچه در استخراج ضرایب و شاخص‌های آلاینده‌گی حداکثر تلاش در کاهش خطا شده است؛ بیشترین مقدار عدم قطعیت در محاسبات این تحقیق می‌تواند مربوط به ضرایب شاخص آلاینده‌گی استخراج شده از منابع و داده‌های جمع‌آوری شده باشد.

ارزیابی اقتصادی

سوالات متعددی را پیش از شروع هر طرح سرمایه‌گذاری می‌بایست پاسخ داد. این سوالات مربوط به توجیه‌پذیری طرح از نظر مالی، دوره برگشت سرمایه به سود و سایر شاخص‌های بررسی طرح‌های مالی نظیر ارزش حال خالص و نرخ بازده داخلی است. به منظور ارزیابی اقتصادی، سه سناریو مذکور از نظر سودمندی طرح در طول عمر پروژه (۲۰ سال) با استفاده از نرم‌افزار طرح‌های مالی کامفار (COMFARIII) ارزیابی و مقایسه شدند. COMFAR نرم افزاری است که اجازه می‌دهد تا کاربر به شبیه سازی کوتاه مدت و بلندمدت وضعیت مالی و اقتصادی پروژه‌های سرمایه‌گذاری بپردازد. این نرم افزار باعث کمک کردن به تجزیه و تحلیل پروژه‌های صنعتی و همچنین غیرصنعتی می‌شود. ورودی‌های نرم‌افزار شامل هزینه کل سرمایه‌گذاری (TIC) (شامل هزینه زمین، بناها و زیرساخت، ماشین‌ها و تجهیزات)، هزینه کل تولید (TPC) (شامل کارگر، انرژی، نگهداری و تعمیرات، بیمه و هزینه‌های احتمالی)، قیمت و مقدار محصولات پروژه شامل فروش الکتریسیته به شبکه سراسری برق، فروش بیوکمپوست جامد و مایع و همچنین کاهش در هزینه خرید ماسه برای بستر در نتیجه جداسازی ماسه از کود و کاهش در هزینه تعمیرات تجهیزات فرآوری کود در سراسر چرخه برای محاسبه درآمد کل (TR) و تسهیلات دولتی می‌باشد. سود ناخالص (GP) از مابه‌التفاوت درآمد ناخالص و هزینه‌های تولید بدست آمد. لازم به توضیح است که محاسبات مالی

جدول ۹. ضرایب اقتصادی داده‌های ورودی به نرم‌افزار کامفار

نگهداری و تعمیرات (ساختمان‌ها)	%	۳	نرخ مالیات	%	۲۵
نگهداری و تعمیرات (ماشین‌ها)	%	۵	نرخ بیمه	%	۰/۵
جداکننده ماسه از کود	%	۱۰	نرخ تنزیل سالیانه	%	۲۰
طول عمر پروژه	سال	۲۰	وام	%	۷۰
نرخ اسقاطی	%	۱۰	سهم آورده سرمایه‌گذار	%	۳۰
طول عمر	%		نرخ سود تسهیلات	%	۱۸
ساختمان و بناها	سال	۲۰	دوره تنفس وام	ماه	۶
تجهیزات و ماشین‌ها	سال	۱۲	دوره بازپرداخت وام	سال	۵
هزینه‌های پیش از سرمایه‌گذاری	%	۱۰	نرخ خرید برق	ریال	۳۱۵۰
هزینه‌های احتمالی	%	۱۰	نرخ خرید کمپوست جامد	ریال	۱۰۰۰
هزینه‌های اداری	%	۵	نرخ خرید کمپوست مایع	ریال	۱۰۰
مالیات بر درآمد	%	۰	نرخ تبدیل یورو (مرداد ۱۳۹۶)	ریال / یورو	۴۵۰۰۰

نتایج و بحث

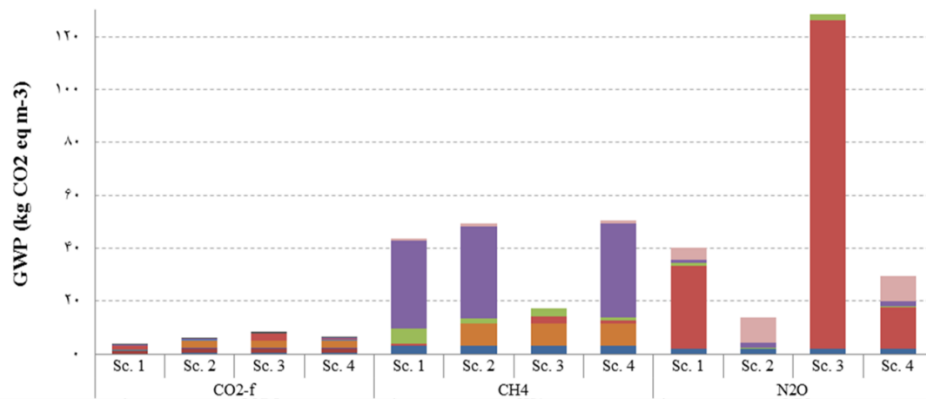
طبق نتایج استخراج شده، ترکیب کود تولیدی در واحد دامداری مورد تحقیق، تعیین گردید. در جدول ۱۰ ترکیب کود محاسبه شده به ازای واحد کود تولیدی (m^3) و برای مجموع کل دامداری آمده است. میزان نیتروژن دریافتی از طریق خوراک دام $0.64, 0.17$ و 0.22 به ترتیب برای گاوهای شیرده، خشک و تلیسه و گوساله‌ها محاسبه شد. از این مقدار $0.21 \text{ kg animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$ در شیر تولیدی و 0.1 day^{-1} به صورت انرژی صرف رشد در گوساله‌ها شده است. بنابراین، مقدار نیتروژن دفع شده در کود به ترتیب برابر $0.43, 0.17$ و 0.21 برآورد گردید. این مقادیر با مطالعات (Huhtanen et al., Dijkstra et al., 2013)، (Kebreab et al., 2010, 2008) مشابه بدست آمد. مقدار محتوای آمونیوم کود (TAN) برابر با 0.70 برای کل گله محاسبه شد که بیانگر میزان نیتروژن دفع شده به فرم معدنی است. نسبت TAN در مطالعه Velthof et al. (2012) نیز برابر 0.7 بدست آمده است. در نتیجه میزان تولید کود دامی خالص در این واحد با توجه به جیره مصرفی برای دام‌ها برابر 50.4 تن در روز تخمین زده شده است که حدود 70 تن در روز ماده جامد وجود دارد. ماده فرار حاصله براساس میزان ماده جامد 42 تن در روز بدست آمد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که ماده خشک کود تولیدی در این واحد حدود 14% بوده که حاوی 60% ماده فرار براساس DM است.

نتایج اعمال سناریوهای مختلف از نظر تولید آلاینده‌های CO_2 ، CH_4 و N_2O بر حسب $kg \text{ CO}_{2eq} m^{-3}$ در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این نمودار مقایسه بین سه سناریو آینده با وضعیت فعلی واحد دامپروری از نظر روش‌های مدیریت کود

نمایان است. معادل پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) برای گازهای آلاینده CH_4 و N_2O به ترتیب برابر 25 و 265 در نظر گرفته شد (IPCC, 2006a). براساس نتایج، تولید آلاینده CO_2 ناشی از کاربرد سوخت‌های فسیلی در بازه $3/9$ تا $9/5$ تخمین زده شده است که در مقایسه با گازهای CH_4 و N_2O بسیار کمتر بدست آمده است. همانطور که در نمودار مشخص شده است، مراحل جداسازی مکانیکی بخش جامد و مایع و جداسازی ماسه تأثیر ناچیزی در تولید آلاینده‌ها نشان دادند؛ در حالی که با بازیافت ماسه منافع اقتصادی نظیر کاهش ماسه مورد استفاده برای بستر حاصل می‌شود که در محاسبات سودمندی لحاظ گردیده است. از سوی دیگر جداسازی بخش مایع و جامد کود سبب کاهش هزینه‌های حمل کود خواهد شد که در این تحقیق مقدار آن در محاسبات لحاظ نشده است. جداسازی بخش مایع و جامد کود و هضم بی‌هوازی در کاهش آلاینده‌ها مؤثر هستند؛ در حالی که فرآیند تولید کمپوست در سناریو ۱ و ۳ از آلاینده‌ترین مراحل فرآوری کود محسوب می‌شود. گاز عمده تولیدی در این سناریو N_2O و به میزان $3 \text{ kg CO}_{2eq} m^{-3}$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود ذخیره کود مایع پس از هضم بی‌هوازی نیز تولید گاز متان دارد. مطالعات متعددی به تلفات بالای کربن و نیتروژن در طی کمپوست کردن اشاره داشته‌اند (Hao et al., 2001; Sommer, 2001). سناریو ۱ با ذخیره نیمی از کود مایع پس از جداسازی حدود kg $33 \text{ CO}_{2eq} m^{-3}$ گاز متان تولید می‌کند. گاز متان تولیدی در سناریو ۲ و ۴ برابر $35 \text{ kg CO}_{2eq} m^{-3}$ می‌باشد که این میزان با احتساب ذخیره 10% کود مایع در مقایسه با سناریو ۱ کاهش چشمگیری داشته است. دنبال کردن اثرات کربن و تلفات نشان

جدول ۱۰. مشخصات و ترکیب محاسبه شده برای کود تولیدی

مشخصات کود	براساس گروه سنی هر رأس دام (kg day^{-1})			مجموع ($\text{kg farm}^{-1} \text{day}^{-1}$)
	گاوی شیرده	گاوی خشک	تلیسه/گوساله	
انرژی ناخالص حیوان (GE) (MJ day^{-1})	۴۲۷/۶۹	۱۱۷/۸۴	۱۶۰/۳۵	-
انرژی مورد نیاز رشد (NE_g) (MJ day^{-1})	۰	۰	۱۶/۴۶	-
نیترژن دریافتی در خوراک	۰/۶۴	۰/۱۷	۰/۲۲	۳،۹۶۳/۲۲
نیترژن جذبی در فرآیند رشد	۰/۲۱	۰	۰/۰۱	۱،۰۴۱/۴۶
نیترژن دفعی	۰/۴۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۲،۹۳۱/۰۶
فسفر دریافتی در خوراک	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۴۵۶/۵۷
فسفر جذبی در فرآیند رشد	۰/۰۴	۰	۰	۲۱۶/۶۰
فسفر دفعی	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۲۳۹/۹۷
پتاسیم دریافتی در خوراک	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۱۸	۲،۱۳۲/۱۰
پتاسیم جذبی در فرآیند رشد	۰/۰۷	۰	۰	۳۱۹/۶۱
پتاسیم دفعی	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۱۸	۱،۸۱۲/۵۰
ماده فرار (VS)	۶/۵۷	۱/۸۶	۲/۵۶	۴۱،۷۹۵/۶۶
ماده فرار تجزیه پذیر (VS_d)	۲/۷۴	۰/۷۷	۱/۰۷	۱۷،۴۱۴/۸۶
ماده فرار تجزیه ناپذیر (VS_{nd})	۳/۸۳	۱/۰۸	۱/۴۹	۲۴،۳۸۰/۸۰
کربن دفعی	۳/۸۱	۱/۰۸	۱/۴۹	۲۴،۲۴۱/۴۸
ماده جامد کل	۹/۶۶	۲/۶۶	۳/۵۳	۶۹،۵۴۸/۸۰
کل کود دفعی	۸۰/۴۸	۲۲/۱۹	۲۹/۴۰	۵۰۴،۵۷۳/۳۵
درصد TAN (اعشار)	۰/۶۲	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۰
نسبت C:N	۸/۷۹	۶/۴۷	۷/۱۳	۷/۴۶

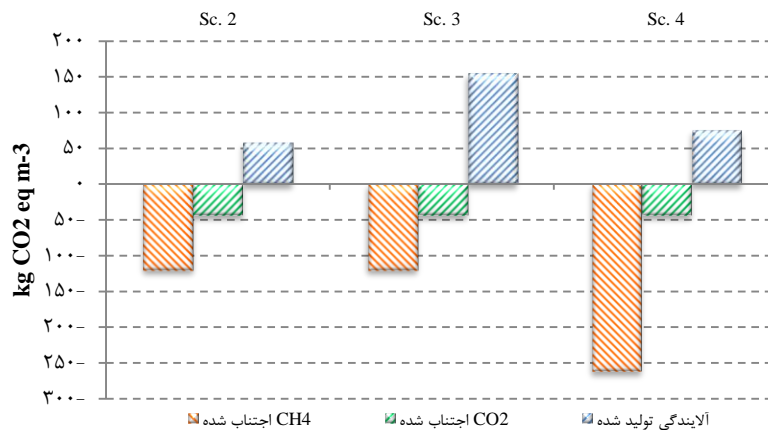


منبع	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4
تخلیه در آب های سطحی	۰	۰	۰	۰	۰/۷	۱/۲	۰	۱/۲	۴/۷۳	۹/۵	۰	۹/۵
انتقال کود جامد	۰/۵	۰/۱	۰/۷	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ذخیره کود مایع	۰/۱	۰/۲	۰	۰/۲	۳۳/۵	۳۴/۷	۰	۳۵/۴	۱/۱	۱/۷	۰	۱/۷
ذخیره کود جامد	۰	۰	۰	۰	۵/۶	۲/۱	۳	۱/۳	۱/۱	۰/۳	۲/۳	۰/۳
کامپوست سازی	۱/۶	۰	۲/۷	۰/۴	۰/۸	۰	۲/۸	۱/۲	۳۱/۲	۰	۱۲۴	۱۵/۶
جداسازی مکانیکی-۲	۰	۰/۴	۰	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
هضم بیولوژی	۰	۲/۹	۲/۹	۲/۹	۰	۸/۴	۸/۴	۸/۴	۰	۰	۰	۰
جداسازی مکانیکی-۱	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جداسازی شین	۰	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
انتقال-۱	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جمع آوری کود	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۳	۳	۳	۳	۲/۱	۱/۲	۲/۱	۲/۱

شکل ۳. بررسی اثر کربن در روش های مختلف مدیریت کود و سناریوهای بررسی شده (سلول خالی بیانگر عدم انجام آن عملیات است)

است که در صورت ذخیره کود بدون تولید بیوگاز حاصل می-شود. CO_2 قابل اجتناب ($42/4 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$) مقدار آلاینده‌گی است که در صورت جایگزینی بیوالکتریسته با سوخت فسیلی حذف می‌شود. با توجه به این نتایج، سناریو ۴ بهترین نتایج را از نظر کاهش آلاینده‌گی نشان داد. در بررسی که Pardo et al. (2017) انجام دادند، مزایای مشابهی از نظر میزان کاهش در گازهای آلاینده در مقایسه روش‌های مختلف هضم بی‌هوازی گزارش شد. طبق مطالعه آنها با استحصال بیوگاز در دامپروری از تولید حدوداً $111 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ m}^{-3}$ اجتناب می‌شود.

داد که پس از هضم بی‌هوازی، ۹٪ از ماده فرار موجود در کود کاهش می‌یابد که این کاهش در نتیجه تجزیه مواد ارگانیک کود می‌باشد. در مطالعه مشابهی (Pardo et al. (2017، مقدار تجزیه مواد ارگانیک را ۷٪ در طی تولید بیوگاز محاسبه نمود. در سناریو ۴ با تلفیق جداکننده مایع/جامد و کمپوست کردن پسماند هاضم بی‌هوازی از مقدار N_2O کاسته شده در حالی که تغییری در میزان CH_4 تولیدی در ذخیره کود مایع حاصل نشده است. در نمودار شکل ۴، مجموع آلاینده‌گی تولید شده و اجتناب شده هر سناریو در نتیجه جایگزینی بیوگاز با مقادیر منفی نشان داده شده است. منظور از CH_4 اجتناب شده مقدار گاز متانی



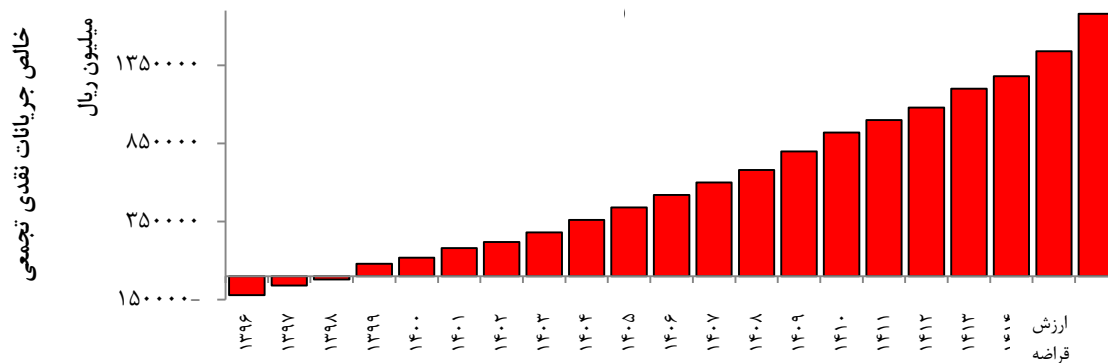
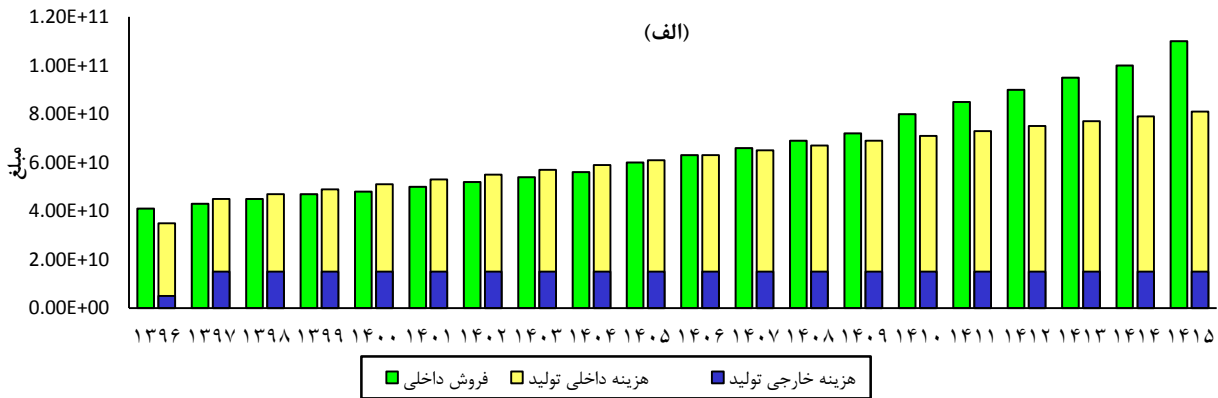
شکل ۴. مقادیر آلاینده‌گی تولید شده و اجتناب شده در تولید بیوگاز

شاخص‌های توجیه‌پذیری این طرح‌ها در جدول ۱۱ آمده است. در شکل ۵ (ب)، جریان‌ات نقدی تجمعی و دوره برگشت سرمایه نشان داده شده است. معیار دوره‌ی برگشت سرمایه نیز نشان دهنده‌ی مدت زمانی است که طی آن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه طرح با خالص درآمد جبران می‌شود (Jafari Samimi, 1997). نرخ بازدهی داخلی نیز برای تمام پروژه‌ها از نرخ سود وام دریافتی از بانک بیش‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود نسبت فایده به هزینه نیز که از تقسیم ارزش فعلی درآمدها بر ارزش فعلی هزینه‌ها به دست می‌آید، بزرگ‌تر از یک است که نشان می‌دهد طرح دارای توجیه اقتصادی می‌باشد. در مطالعه Torquati et al. (2014) فواید اقتصادی مشابهی برای پروژه‌های بیوگاز در ایتالیا گزارش شده است. طبق مطالعه آن‌ها تولید بیوگاز با تولید الکتریسته، درآمد سالانه در حدود ۴۷ میلیارد ریال (معادل ۱۰۵۸،۶۸۰ یورو) خواهد داشت. این در حالی است که تولید بیوگاز دارای اثرات مثبت اجتماعی و اقتصادی دیگری نظیر افزایش سلامت عمومی، پایداری در تولید، کاهش

بررسی اقتصادی صورت گرفته با استفاده از روابط (۱۸) الی (۲۲) نشان می‌دهد که در آمد کل (TIC) برای سناریوهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۱۲۲،۸۲۱، ۱۲۵،۴۳۸ و ۱۲۶،۲۰۳ میلیارد ریال است. مثبت بودن مقدار شاخص ارزش حال خالص (NPV) بدست‌آمده، به ترتیب برابر ۱۴۵، ۲۱۷ و ۱۵۹ میلیارد ریال، حاکی از جذابیت این طرح‌ها می‌باشد. یکی از دلایل اصلی در جذابیت این طرح‌ها برخورداری سرمایه‌گذاران از تعرفه بالای خرید برق تجدیدپذیر از سوی وزارت نیرو است. به همین دلیل بسیاری از دامداران واحدهای بزرگ به سرمایه‌گذاری در این طرح‌ها تمایل پیدا کرده‌اند. همچنین فروش محصولات جانبی از پسماند هاضم نیز دارای ارزش و مطلوبیت می‌باشد. نتایج توزیع درآمد فروش و هزینه‌های داخلی و خارجی در طول عمر پروژه بیوگاز در مدیریت کود در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد، به دلیل عدم وجود تجهیزات بیوگاز در کشور، این مطالعه با فرض اجرای پروژه با مشارکت شرکت خارجی صورت گرفته است. سایر

در تحقیق دیگری در ایران مشخص شد که تولید پراکنده برق از بیوگاز در گاوداری‌های صنعتی از دیدگاه بخش خصوصی دارای صرفه اقتصادی است (Sadeghi et al., 2014).

هزینه‌های حمل و نقل کود می‌باشد که در این مطالعه به آن‌ها پرداخته نشده است. در مطالعه‌ی اخیر دیگری روش هضم بی‌هوازی روشی با توجیه‌پذیری اقتصادی در مقایسه با سایر روش‌ها در بازیافت لجن ارگانیک معرفی شد (Li et al., 2017).



شکل ۵. (الف) درآمد فروش و هزینه‌های پروژه تولید بیوگاز (ب) خالص جریان نقدی تجمعی و دوره برگشت سرمایه پروژه سرمایه‌گذاری بیوگاز

انتقال و تعمیرات دستگاه‌های فرآوری کود مؤثر است. جداسازی مکانیکی بخش مایع و جامد کود علاوه بر کاهش گازهای آلاینده (بخصوص گاز متان) در مرحله ذخیره کود، در کاهش هزینه انتقال کود با جدا شدن بخش مایع و آبکی آن و جلوگیری از استعمال کود بیش از نیاز گیاه و خاک مؤثر است. طبق نتایج مطالعه حاضر، تولید بیوگاز دارای مزایای بسیاری در کاهش اثرات منفی زیست محیطی و مزایای اقتصادی می‌باشد؛ به‌طوری‌که از تولید و انتشار گاز متان ناشی از ذخیره کود جلوگیری به عمل آمده و محصولات جانبی نظیر الکتریسیته و حرارت تولیدی جایگزین منابع انرژی فسیلی خواهد بود. در این مطالعه علاوه بر هضم بی‌هوازی، با در نظر گرفتن چرخه مدیریت کود، مرحله فرآوری پساب هاضم به دو شکل جداسازی لجن و یا کمپوست کردن آن مورد بررسی قرار گرفت. کمپوست کردن با وجود داشتن شاخص‌های بهتر مالی (PBP کوتاه‌تر،

جدول ۱۱. شاخص‌های مالی محاسبه شده ۳ سناریو آینده

شاخص	NPV	PI	PBP	M IRR	BCR	واحد
	میلیارد ریال	-	سال	%	-	
سناریو ۲	۱۴۵/۵	۱/۲۴	۴	۲۲	۲/۴۲	
سناریو ۳	۲۱۶/۸	۱/۷۲	۲	۲۴	۲/۵۱	
سناریو ۴	۱۵۸/۹	۱/۵۵	۳/۷	۲۲	۲/۰۹	

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدیریت و فرآوری کود شامل جداسازی ماسه، جداسازی مایع و جامد، کمپوست کردن و استحصال بیوگاز در واحدهای پرورش گاو شیری از جنبه زیست محیطی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، جداسازی ماسه از کود بر تولید گازهای آلاینده مؤثر نمی‌باشد اما در کاهش انرژی مصرفی در فرآیند استخراج و تولید ماسه و همچنین هزینه‌های

حالت با در نظر گرفتن دو هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش سودآوری اقتصادی مفید نمی‌باشد؛ لذا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد؛ همچنین ارزیابی سایر روش‌های فرآوری کود مایع نظیر روش جداکننده اسمز معکوس که با توجه به شرایط کنونی کمبود آب در ایران با تولید آب از فرآوری کود می‌تواند سودمند باشد، اولترافیلتراسیون و سایر فناوری‌های موجود در زمینه هضم بی‌هوازی در چرخه مدیریت کود به تصمیم‌گیران این بخش کمک بسیاری خواهد نمود.

REFERENCES

- Aguirre-Villegas, H.A., Passos-Fonseca, T.H., Reinemann, D.J., Armentano, L.E., Wattiaux, M.A., Cabrera, V.E., Norman, J.M. & Larson, R. (2015). Green cheese: partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. *Journal of Dairy Science*, 98, 1571-1592. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8850>.
- Aguirre-Villegas, H.A. & Larson R.A. (2017). Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *Journal of Cleaner Production*, 143, 169-179
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agricultural Ecosystem Environment*, 112, 153-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.030>.
- Anonymous, Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density, [June 06, 2017].
- Chianese, D.S., Rotz, C.A. & Richard, T.L. (2009). Simulation of carbon dioxide emissions from dairy farms to assess greenhouse gas reduction strategies. *Trans ASABE* 52(4), 1301-12.
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B., (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 112, 171-177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.016>.
- Daneshi, A., Esmaili-sari, A., Daneshi, M. & Baumann, H., (2014). Greenhouse gas emissions of packaged fluid milk production in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 80, 150-158.
- Dentener, F. & Raes, F. (2002). *Greenhouse gases and atmospheric chemistry: towards integration of air pollution and climate change policies*. In: Van Ham J., Baede A.P.M., Guicherit R. and Williams-Jacobse J.G.F.M. eds, Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control Options and Policy Aspects. Millpress, Rotterdam, the Netherlands, pp. 114.
- Dijkstra, J., Oenema, O., van Groenigen, J.W., Spek, J.W., van Vuuren, A.M. & Bannink, A. (2013). Diet effects on urine composition of cattle and N₂O emissions, *Animal*, 7 (2), 292-302, doi:10.1017/S1751731113000578.
- Ecoinvent 3.3 Database, (2016). *Ecoinvent® Swiss Center for Life Cycle Inventories*. Available at <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html>.
- Feedipedia, Animal Feed Resources Information System, (2016). Available at: <http://www.feedipedia.org/>
- FNR, (2006). *Handreichung Biogasgewinnung und – Nutzung. – 3. überarbeitete Auflage; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe edt.; Germany; ISBN 3-00-014333-5 (In German)*.
- Hao, X., Chang, C., Larney, F.J., & Travis, G.R. (2001). Greenhouse Gas Emissions during Cattle Feedlot Manure Composting. *Journal of Environmental Quality*, 30, 376-386.
- Hogan, K.B., Hoffman, J.S. & Thompson, A.M. (1991). Methane on the greenhouse agenda. *Nature*, 354, 181-182.
- Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T. & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100, 5478-5484.
- Hou, Y. (2016). *Towards improving the manure management chain*, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL, 215 pages.
- Huhtanen, P., Nousiainen, J.I., Rinne, M., Kytölä, K. & Khalili, H. (2008). Utilization and partition of dietary N in dairy cows fed grass silage-based diets. *Journal of Dairy Science*, 92, 3222-3232.
- Iglinski, B., Buczkowski, R., Iglinska, A., Cichosz, M., Piechota, G. & Kujawski, W. (2012). Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16, 4890-4900.
- IPCC, (2006a). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol 4, Chapter 10*. [Online]. *Agriculture, forestry and other land use*. Available at: <http://www.ipcc->

- nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html [October 23, 2013].
- IPCC, (2006b). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 5, Chapter 6. [Online]. *Wastewater Treatment and Discharge*. Available at: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf.
- Jafari Samimi, A., 1997. Principles of Engineering economic, Mazandaran University of Science and Technology Pub, Iran (In Persian).
- Jørgensen, P.J. (2009). Biogas – green energy, Process, Design, Energy supply, Environment. Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, 2nd edition, ISBN 978-87-992243-2-1, pp. 36.
- Julian, F., Fabian, G., Hans-Joachim, N., & Hans, O. (2013). Cutting the Electric Power Consumption of Biogas Plants: the Impact of New Technologies. *Landtechnik*, 68(1), 58–63.
- Kebreab, E., Strathe, A.B., Dijkstra, J., Mills, J.A.N., Reynolds, C.K., Crompton, L.A., Yan, T. & France, J. (2010). *Energy and protein interactions and their effect on nitrogen excretion in dairy cows*. In 3rd EAAP international symposium on energy and protein metabolism and nutrition (ed. GM Crovetto), pp. 417–425. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Lansche, J., & Müller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates. *Engineering in life sciences (Eng. Life Sci.)*, 12, (3), 313–320.
- Leip, A., Achermann, B., Billen, G., Bleeker, A., Bouwman, A., de Vries, W., Dragosits, U., Döring, U., Fernall, D., Geupel, M., Herolstab, J., Johnes, P., Le Gall, A. C., Monni, S., Neveceř al, R., Orlandini, L., Prud'homme, M., Reuter, H. I., Simpson, D., Seufert, G., Spranger, T., Sutton, M., van Aardenne, J., Voß, M. & Winiwarter, W. (2011). *Integrating nitrogen fluxes at the European scale. In The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*; Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Bleeker, A., Billen, G., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, U.K., Chapter 16, 345–376.
- Leip, A., Weiss, F., Lesschen, J.P. & Westhoek, H. (2014). The nitrogen footprint of food products in the European Union. *Journal of Agricultural Science*, 152 (S1), 20–33.
- Lelieveld, J., Crutzen, P.J. & Dentener, F.J. (1998). Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus 50B*: 128150.
- Li, H., Jin, C. & Mundree, S. (2017). Hybrid environmental and economic assessment of four approaches recovering energy from sludge with variant organic contents. *Journal of Cleaner Production*, 153, 131-138.
- Masters, G. M. 2004. Renewable and efficient electric power systems, Hoboken, NJ: Wiley.
- Misselbrook, T.H., Gilhespy, S. & Cardenas, L.M. (2014). *Inventory of Ammonia Emissions from UK Agriculture*, Inventory Submission Report, London, UK.
- Møller, H.B., Lund, I. & Sommer, S.G. (2000). Solid-liquid separation of livestock slurry- efficiency and cost. *Bioresource Technology*, 74, 223-229.
- Møller, H.B., Sommer, S.G. & Ahring, B.K. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass Bioenergy*, 26, 485-95.
- Nayyeri, M.A., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A. & Hassan-Beygi, S.R. (2009). Thermal properties of dairy cattle manure. *International Agrophysics*, 23, 359-366.
- NRC, (1989). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*, National Academy Press, Washington, D.C. U.S.A.
- Oenema, O., Oudendag, D. & Velthof, G. L. (2007). Nutrient losses from manure management in the European Union. *Livestock Science*, 112 (3), 261–272.
- Olesen, J.E., Weiske, A., Asman, W.A.H., Weisbjerg, M.R., Djurhuus, J. & Schelde, K. (2004). *FarmGHG, A Model for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Livestock Farms*. Documentation. DJF Internal Report No. 202. Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele, Denmark, 54 pp.
- Opio, C., Gerber, P., Mottet, A., Falcucci, A., Tempio, G., MacLeod, M., Vellinga, T., Henderson, B. & Steinfeld, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains – A global life cycle assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Oskounejad, M.M. 2016. Engineering economy: Economic evaluation of industrial projects. AmirKabir University Pub., Tehran, Iran, 628 pp.
- Pardo, G., Moral, R. & Prado, A. (2017). SIMS WASTE-AD- A modelling framework for the environmental assessment of agricultural waste management strategies: Anaerobic digestion. *Science of the Total Environment*, 574, 806–817.
- Petersen, S.O., Sommer S.G., Béline F., Burtonc C., Dach J., Dourmad J.Y., Leip A., Misselbrook T., Nicholson F., Poulsen H.D., Provolo G., Sørensen P., Vinnerås B., Weiske A., Bernal, M.-P., Böhm, R., Juhász, C., Mihelic, R. (2007). Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock Science*, 112 (3), 180–191.
- Petersen, S.O., Lind, A.M. & Sommer S.G. (1998). Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, 130, 69–79.
- Rotz, C.A. (2004). Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science*. 82, 119-137.
- Rotz, C.A., Corson, M.S., Chianese, D.S., Montes, F., Hafner, S.D., Bonifacio, H.F., & Coiner, C.U. (2016). *Integrated Farm System Model: Reference Manual*. V. 4.3. Available at

- <http://ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19020000/ifsmreference.pdf> (verified September 2016). Pasture systems and watershed management research unit, Agricultural Research Service, USDA.
- Sadeghi, H., Ghaemi, F., Ghazizadeh, M.S., 2014. Benefit-cost analysis of electricity production from biogas at large-scale dairy farms in Iran. *Quarterly Journal of Energy Economic studies*, 10(42), 55-80 (In Persian).
- Schils, R.L.M., de Haan, M.H.A., Hemmer, J.G.A. van den Pol-van Dasselaar, A., de Boer, J.A., Evers, A.G., Holshof, G., van Middelkoop, J.C. & Zom, R.L.G. (2007). DairyWise, a whole-farm dairy model. *Journal of Dairy Science*, 90. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-842>.
- Sommer, S.G. (2001). Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter. *European Journal of Agronomy*, 14, 123-133.
- Sommer, S.G., Petersen, S.O. & Møller, H.B. (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69, 143-154.
- Sommer, S.G., Zhang, G.Q., Bannink, A., Chadwick, D., Hutchings, N.J., Misselbrook, T., Menzi, H., Ni, J.-Q., Oenema, O., Webb, J. & Monteny, G.-J. (2006). Algorithms determining ammonia emission from livestock houses and manure stores, *Advances in Agronomy*, 89, 261-335.
- Torquati, B., Venanzi, S., Ciani, A., Diotallevi, F. & Tamburi, V. (2014). Environmental Sustainability and Economic Benefits of Dairy Farm Biogas Energy Production: A Case Study in Umbria. *Sustainability*, 6, 6696-6713, doi:10.3390/su6106696.
- Velthof, G.L., van Bruggen, C., Groenestein, C.M., de Haan, B.J., Hoogeveen, M.W. & Huijsmans, J.F.M. (2012). A model for inventory of ammonia emissions from agriculture in the Netherlands. *Atmospheric Environment*, 46, 248-255.
- Vonk, J., Bannink, A., van Bruggen, C., Groenestein, C.M., Huijsmans, J.F.M., van der Kolk, J.W.H., Luesink, H.H., Oude Voshaar, S.V., van der Sluis, S.M. & Velthof, G.L. (2016). *Methodology for estimating emissions from agriculture in the Netherlands*. WOt-technical report 53, Wageningen, May 2016. ISSN 2352-2739 <http://dx.doi.org/10.18174/383679>.
- Wedel, A. (2012). *Sand-manure separation*, in Proceedings of the Got Manure? Conference, March 27-29, Liverpool, NY, USA.
- WUM, (2009). *Dierlijke mest en mineralen 1990-2008*. CBS, IKC-Veehouderij, LAMI, LEI-DLO, RIVM en SLM.
- WUR, (2014). *Manure: a valuable resource*. A report published from Wageningen UR Livestock Research. Available at: <http://edepot.wur.nl/294017>.
- Yu, L., Wensel, P., Ma, J. & Chen, S. (2013). Mathematical modeling in anaerobic digestion (AD). *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, S4, 003.