چالش‌ها و راهکارهای پایدار در زنجیره مواد غذایی و کشاورزی

کوثر رحمانی*[۱]

۱- **Kosar Rahmani** رایانامه: **rahmani.kosar1998@gmail.com**

خلاصه

رشد سریع جمعیت، افزایش تقاضای جهانی برای غذا و انرژی وتشدید بحران‌های زیست‌محیطی، ضرورت بازنگری در شیوه‌های مدیریت پسماند در صنایع غذایی و کشاورزی را بیش از پیش نمایان ساخته است. این صنایع از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان پسماندهای آلی و زیستی به شمار می‌روند که در صورت مدیریت نامناسب منجر به اتلاف منابع، آلودگی محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. در مقابل، پسماندهای کشاورزی و غذایی به دلیل ماهیت زیست‌تخریب پذیر، ظرفیت بالایی برای بازیافت انرژی و تولید محصولات با ارزش افزوده نظیر بیواتانول،بیوگاز،بیومس و کودهای آلی دارند. این مقاله با مرور ادبیات موضوع و شناسایی روش‌های علمی به کارگیری ضایعات مانند هضم بی‌هوازی، تبدیل بیومس به بیواتان (bio-fuel)، کمپوست و تولید کود یا انرژی تلاش می‌کند چارچوبی برای مدل «اقتصاد چرخشی» در صنایع غذایی و کشاورزی پیشنهاد دهد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مسیرهای مناسب می‌توان هم پسماند را به منبعی با ارزش تبدیل کرد و هم به کاهش اثرات زیست‌محیطی و تأمین انرژی پایدار کمک نمود.

کلمات کلیدی: مدیریت پسماند، بیومس، هضم بی‌هوازی، بیوگاز، کشاورزی پایدار، صنایع غذایی.

۱. مقدمه

صنایع غذایی و بخش کشاورزی سهم بسیار زیادی در تولید پسماندهای آلی جامد و مایع دارند. بر اساس گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)[۱]، حدود یک‌سوم مواد غذایی تولیدشده در جهان به ضایعات تبدیل می‌شود. این ضایعات شامل بقایای محصولات کشاورزی،ضایعات بسته‌بندی،پسماندهای فرآوری مواد غذایی و پساب‌های صنعتی است. مدیریت نادرست این پسماندها سبب انتشار گازهای گلخانه ای، آلودگی آب و خاک و افزایش ردپای کربن می‌شود.

در مقابل، این پسماندها با توجه به ترکیبات زیستی و آلی که دارند پتانسیل بالایی برای تبدیل به منابع انرژی نو (بیومس، بیوگاز، بیواتان) یا کود آلی/کمپوست دارند. بنابراین، طراحی و اجرای راهکارهای علمی و پایدار برای مدیریت پسماند و بازیافت انرژی در این بخش‌ها، می‌تواند هم به کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی کمک کند و هم بر امنیت غذایی و انرژی تأثیر مثبت بگذارد.

[1] Food And Agriculture Organization Of The United Nations

۲. منابع پسماند در کشاورزی و صنایع غذایی

پسماندهای تولیدشده در بخش کشاورزی و صنایع غذایی سهم قابل‌توجهی از کل پسماندهای آلی جهان را تشکیل می‌دهند. این پسماندها بسته به مرحله تولید، برداشت، فرآوری و مصرف، دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی هستند . پسماندهای این صنایع شامل سه گروه اصلی هستند:

۱ .پسماندهای آلی قابل تجزیه: ضایعات میوه، سبزی، دانه، باگاس، تفاله‌ها

۲ .پسماندهای غیرآلی: پلاستیک، فلزات، بسته‌بندی

۳ .پسماندهای ویژه: فاضلاب صنعتی، روغن مصرف‌شده، گل‌ولای ته‌نشین شده،که به دلیل ماهیت شیمیایی و فرآیند مدیریت متفاوت نیازمند رویه های تخصصی هستند.

همچنین، پسماندهای آلی در صنایع غذایی معمولاً بخش اعظم (بیش از نصف تا بیش از سه‌چهارم) کل پسماند تولیدی را تشکیل می‌دهند و به‌دلیل محتوای آلی بالا، بهترین گزینه برای تبدیل به انرژی‌های زیستی مانند بیوگاز و سایر سوخت‌های تجدیدپذیر هستند.[۱]

۲-۱. پسماندهای تولیدی در بخش کشاورزی

پسماندهای کشاورزی عمدتاً در مراحل کاشت، داشت و برداشت محصولات زراعی و باغی تولید می‌شوند. این پسماندها شامل بقایای گیاهی بوده و از نظر زیست‌تجزیه‌پذیری بسیار غنی هستند. این گروه شامل کاه و کلش گندم و برنج، ساقه ذرت، بقایای نیشکر (باگاس)، ساقه پنبه و بقایای دانه‌های روغنی است. این پسماندها اغلب دارای نسبت کربن به نیتروژن بالا بوده و برای تولید انرژی زیستی، بیوچار و کمپوست مناسب‌اند.

۲-۲. پسماندهای صنایع غذایی

در صنایع غذایی، پسماندها شامل تفاله میوه‌ها،پسماند های فرآوری گوشت و ماهی،بقایای کشتارگاهی، ضایعات نانوایی و ضایعات لبنی هستند. این پسماندها اغلب دارای رطوبت بالا و قابلیت تجزیه زیستی سریع می باشند.

۲-۳. چالش‌های مدیریت ضایعات

- ترکیب متغیر و اغلب با رطوبت بالا که سبب فساد سریع می‌شود.
- پراکندگی محل تولید (مزارع، واحدهای فرآوری، بازارها) و نبود زیرساخت واحد مدیریت متمرکز.
- هزینه و پیچیدگی حمل و نقل ضایعات تر و نیاز به جداسازی مناسب. [۳]

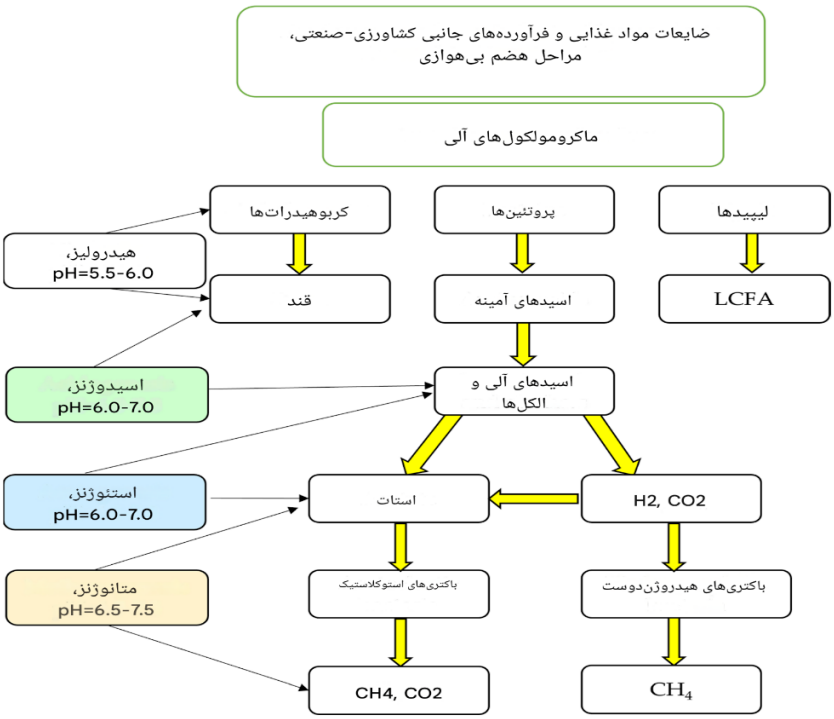
۳. روش‌های مدیریت پسماند و بازیافت انرژی

مدیریت پسماند شامل مراحل کاهش در مبدأ، تفکیک، جمع‌آوری، بازیافت و دفع نهایی است. در صنایع غذایی و کشاورزی، تمرکز اصلی بر کاهش تولید ضایعات و استفاده مجدد از آن‌ها در چرخه تولید است. پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت یکپارچه می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و بهره‌وری منابع را افزایش دهد.

۳-۱. هضم بی‌هوازی[۲]

هضم بی هوازی یکی از روش‌های اصلی برای تبدیل پسماند زیستی به بیوگاز (متان) است در این فرآیند، میکروارگانیسم‌ها مواد آلی را در غیاب اکسیژن تجزیه کرده و بیوگاز تولید می‌کنند. بیوگاز حاوی متان و کربن دی اکسید بوده و می‌تواند برای تولید برق و حرارت استفاده شود. این فرآیند شامل چهار مرحله اصلی است: هیدرولیز، اسیدوژنز، استوژنز و متانوژنز(شکل ۱)[۴]

مزایای روش هضم بی هوازی عبارتند ازکاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای،مناسب برای ضایعات با رطوبت بالا، تولید انرژی پاک، تولیدکود یا ماده آلی قابل بازگشت به خاک.به صورت میانگین هر تن پسماند غذایی حدود ۴۰ تا ۱۲۰ مترمکعب و هر تن کود دامی حدود ۳۰ تا ۵۰ متر مکب بیوگاز تولید می کنند.



شکل.۱شماتیک پروسه هضم بی‌هوازی (تبدیل ضایعات کشاورزی/غذایی به بیوگاز + کود)

[2] Anaerobic Digestion

۲-۳. روش‌های گرما-شیمیایی و بیوشیمیایی

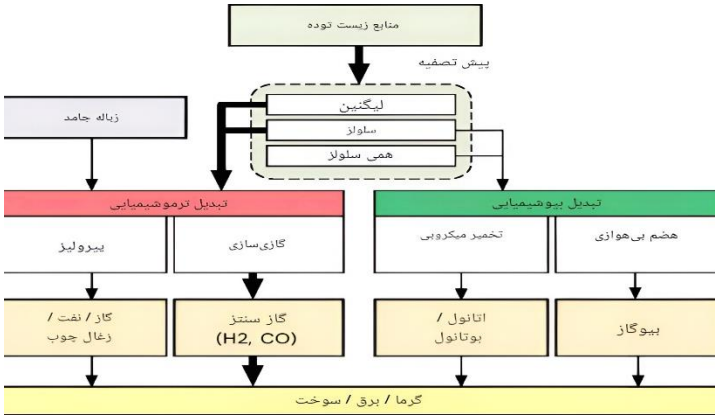
پسماندهای کشاورزی مانند کاه، ساقه، پوست میوه، تفاله قابل تبدیل به بیومس، بیوانرژی، بیواتانول یا بیوچوب هستند. مسیرها شامل: گازی‌سازی، پیرولیز، هیدروترمال،یا بیورفاینری با ترکیب روش‌های مختلف(شکل ۲). این روش‌ها می‌توانند تأمین انرژی تجدیدپذیر، کاهش وابستگی به سوخت فسیلی و استفاده بهینه از ضایعات را ممکن کنند. گازی‌سازی و پیرولیز روش‌های ترموشیمیایی هستند که در آن‌ها پسماند در دماهای بالا و در حضور اکسیژن محدود (یا بدون اکسیژن) تبدیل به انرژی، بیوچار و محصولات جانبی دیگر می‌شود. این روش‌ها باعث افزایش ارزش انرژی پسماند و کاهش آلایندگی می‌گردند. این تکنولوژی‌ها به‌ویژه برای پسماندهای کشاورزی مناسب هستند زیرا حجم زیاد آن‌ها و ترکیبات آلی غنی، منجر به بازده بالای تولید انرژی می شود. توسعه روش‌های ترکیبی مانند پیرولیز پس از هضم بی هوازی می‌تواند بازده انرژی را افزایش دهد.

جدول۱.محصولات قابل تولید از پسماند های آلی

نوع پسماند آلی	محصول	فرآیند تولید	کاربرد
ضایعات میوه و سبزی	بیوگاز	هضم بی هوازی	تولید برق / گرما
پسماندهای نشاسته ای	بیواتانول	تخمیر	سوخت تجدیدپذیر
روغن های گیاهی مستعمل	بیودیزل	ترانس استریفیکاسیون	سوخت سبز
بقایای خشک کشاورزی	بیوچار	پیرولیز	بهبود خاک

۳-۳. بازیافت عناصر غذایی و تولید کود ارگانیک / کمپوست

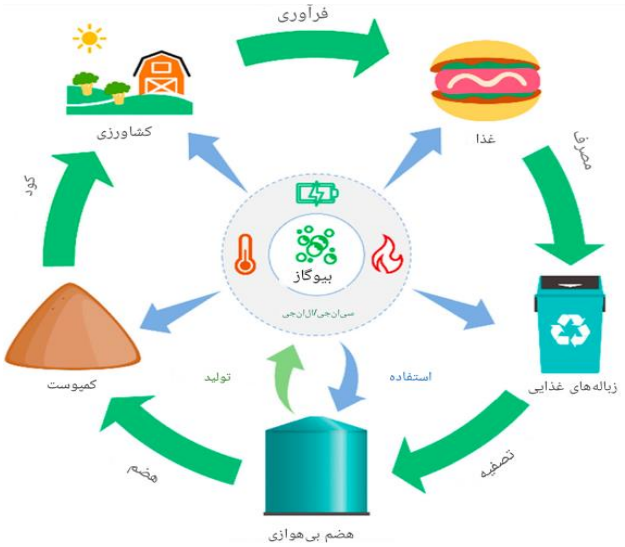
بخش عمده ضایعات غذایی قابل کمپوست یا هضم بی‌هوازی هستند؛ با این روش می‌توان نه تنها انرژی تولید کرد، بلکه کود آلی غنی برای خاک کشاورزی فراهم آورد. استفاده از پساب‌ها یا digestate حاصل از هضم بی هوازی برای تغذیه خاک، کاهش نیاز به کود شیمیایی و تقویت کشاورزی پایدار را به دنبال دارد.[۵]



شکل ۲.نمودار مسیر تبدیل بیومس / پسماند به انرژی و مواد با ارزش

۴.رویکردهای چرخه ای

اقتصاد چرخه‌ای به مفهوم استفاده مجدد از منابع در یک چرخه بسته به‌منظور کاهش ضایعات و به حداکثر رساندن استفاده از مواد است شکل ۳. این رویکرد مستلزم طراحی محصولات، فرآیندها و زنجیره تأمین به گونه‌ای است که مواد قابل بازیافت به کار خود بازگردند.در صنایع غذایی و کشاورزی، استفاده از رویکردهای چرخه‌ای مانند تبدیل پسماند به مواد افزودنی غذایی، خوراک دام، بیوپلاستیک‌ها، کودهای آلی و انرژی باعث کاهش مصرف مواد اولیه تازه و بهبود پایداری اقتصادی می‌شود.[۶]



شکل ۳.مدل اقتصاد چرخشی مبتنی بر بازیافت پسماند به کود یا انرژی

۵. مزایا و چالش‌ها

۵-۱ مزایا

- کاهش میزان پسماند و دورریز مواد غذایی و کشاورزی.
- تولید انرژی تجدیدپذیر (بیوگاز، بیومتان، بیواتانول...) و کاهش وابستگی به سوخت فسیلی.
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی زیست‌محیطی.
- تولید کود و ماده آلی برای بهبود کیفیت خاک و افزایش پایداری کشاورزی.
- حرکت به سمت اقتصاد چرخشی [۳] و استفاده کامل از منابع.

۵-۲ چالش‌ها

- نیاز به زیرساخت مناسب برای جمع‌آوری، جداسازی و حمل ضایعات.
- هزینه اولیه نسبی برای راه‌اندازی واحدهای هضم بی هوازی یا بیورفاینری.

[3] Circular Economy

- نوسان و تغییر در ترکیب ضایعات (رطوبت، ترکیب شیمیایی، آلودگی) که ممکن است بر کارایی تبدیل تأثیر بگذارد.
- نیاز به دانش فنی و مدیریت بهینه فرآیندها.

۶.مطالعات موردی پروژه‌های موفق انرژی زیست‌توده

چندین پروژه موفق انرژی زیست‌توده، امکان‌سنجی و مزایای تبدیل ضایعات کشاورزی به انرژی را نشان داده‌اند.در پژوهشی(روح اللهی و همکاران، ۲۰۱۶) ، بررسی شد که استفاده از تاسیسات بیوگاز در دامداری‌های ایران می‌تواند ضمن مدیریت پسماند دامی، بیوگاز و کود زیستی تولید کند و از این راه به درآمدزایی و پایداری انرژی کمک کند.تحلیل اقتصادی نشان داد که پروژه‌های بیوگاز در مزرعه می‌توانند بازگشت سرمایه کمتر از ۴ سال داشته باشند واین نمونه نشان می‌دهد که روش‌های هضم بی‌هوازی می‌توانند به یک راهکار چندمنظوره برای مدیریت پسماند و تولید انرژی در بخش کشاورزی تبدیل شوند.[۷] پسته یکی از محصولات کشاورزی استراتژیک ایران است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ بررسی کرده است که پسماندهای پسته به‌عنوان منبع انرژی در سیستم‌های تولید همزمان برق و گرما چگونه قابل استفاده هستند. چهار سناریو برای استفاده از پسماند پسته شامل سوزاندن، گازی‌سازی با موتور بیوگاز، گازی‌سازی با پیل سوختی SOFC و گازی‌سازی با توربین بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت. سناریو گازی‌سازی با موتور بیوگاز از نظر اقتصادی بهترین بازده را داشت و هزینه سطحی برق تولیدشده بسیار پایین بود.این مطالعه نشان داد استفاده از پسماند پسته ضمن تولید انرژی، می‌تواند انتشار متان را کاهش داده و مصرف گاز طبیعی را تقلیل دهد. و مثال بسیار خوبی از ادغام مدیریت پسماند کشاورزی با تولید انرژی تجدیدپذیر در ایران است.(مرآتی زمان و همکاران، ۲۰۲۵)[۸]
در یک مطالعه علمی (اردبیلی، ۲۰۲۰)، پتانسیل تولید برق از بیوگاز حاصل از هضم بی‌هوازی پسماندهای کشاورزی و دامی در ایران بررسی شده است که نشان داد منابع پسماند کشاورزی مانند گندم، برنج، سیب‌زمینی، سیب، انگور و محصولات صنعتی نظیر چغندرقند می‌توانند به‌عنوان خوراک پسماند مورد استفاده قرار گیرند. کل پتانسیل پسماند کشاورزی حدود ۲۴/۳ میلیون تن در سال بوده که می‌تواند به حدود ۶/۵۴۲ میلیارد مترمکعب بیوگاز تبدیل شود. پتانسیل تولید برق پاک از این منابع معادل ۶۲/۸۰۸ × ۱۰^۶کیلووات‌ساعت در سال است، که تقریباً ۲۷٪ از کل مصرف برق کشور را پوشش می‌دهد. این فرآیند می‌تواند سالانه حدود ۴/۰۹۶ میلیون تن CO_2-eq کاهش گازهای گلخانه‌ای داشته باشد.[۹]

ذوالفقاری و واعظی پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در شهرستان جوین استان خراسان رضوی را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور میزان کود دامی قابل جمع آوری در این شهرستان و میزان بیوگاز حاصل از آن محاسبه گردید .حجم کل کود دامی قابل جمع آوری در این شهرستان ۱۳۶۸۲۶ تن در سال محاسبه شد. ارزش حرارتی بیوگاز ۵/۹۶ و ارزش حرارتی گاز طبیعی ۷/۵۲ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب می باشد. بنابراین ارزش حرارتی بیوگاز برابر ۰/۷۹ ارزش حرارتی گاز طبیعی است. اگر کل کود دامی جمع آوری شده در شهرستان به بیوگاز تبدیل شود، سااانه معادل ۳۲/۴ میلیون متر مکعب بیوگاز تولید خواهد شد. این بیوگاز با توجه به ارزش حرارتی آن معادل با ۲۵/۶ میلیون متر مکعب گاز طبیعی خواهد بود. [۱۰]

فلاح نژاد فتحی و همکاران پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در روستاهای ایران را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا آمار و اطالعا ت تعداد و نوع هر دام به دست آمد. سپس با استفاده از آمار تولید فضولات سالانه هر نو ع دام در کل روستاهای کشور برآورد شد. با توجه به نتایج، مقدار کل کود دامی در روستاهای کشور در سال ۱۳۸۲، ۴۳ میلیون

همچنین مجموع پسماند .تن و بیوگاز قابل استحصال از این پسماند ۱۱ میلیارد و ۱۹۵ میلیون متر مکعب برآورد شد تجزیه پذیر روستاهای کشور ۱ میلیون و ۲۴۹ هزار تن برآورد شد. از این میزان پسماند، ۴۸۷ میلیون متر مکعب بیوگاز قابل استحصال است. با افزایش جمعیت انسانی و دام در سال های آینده، امکان تولید انرژی بیوگاز حاصل از کود دامی و پسماند تجزیه پذیر روستایی نیز افزایش خواهد یافت.[۱۱]

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به حجم بالای ضایعات کشاورزی و غذایی در جهان، نادیده گرفتن ظرفیت آنان برای بازیافت انرژی و مواد مغذی، هدررفت منابع و آلودگی است. روش‌هایی مانند هضم بی‌هوازی، بیورفاینری، تبدیل بیومس و کمپوست فرصت فوق‌العاده‌ای برای ایجاد چرخه بسته منابع و انرژی فراهم می‌کنند.کشور ایران دارای پتانسیل عظیم برای تبدیل پسماندهای کشاورزی و دامی به انرژی برق پاک و کاهش انتشار آلاینده‌ها است اما تاکنون این ظرفیت به‌طور کامل استفاده نشده است.

برای بهره‌وری بهینه توصیه می‌شود:

- سیاست‌های حمایتی و تشویقی برای ایجاد واحدهای بازیافت و بیوگاز تصویب شود؛
- زیرساخت جمع‌آوری و جداسازی ضایعات در زنجیره کشاورزی–صنعتی تا بازار برقرار گردد؛
- پژوهش و توسعه در تکنولوژی‌های تبدیل ضایعات — از جمله بیورفاینری، بیوماتر، بیواتانول و ... ادامه یابد؛
- آموزش و آگاهی‌سازی فعالان زنجیره غذایی و کشاورزی درباره فواید و روش‌های پایدار مدیریت پسماند انجام شود.

۸. مراجع

۱. صفری، م.، احمدی، م.، & صفری، غ. (۲۰۲۲). مروری بر مزایا و کاربرد فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی. مطالعات علوم محیط زیست, ۸(۴), ۷۱۸۵–۷۲۰۲.

2. Kumar, P., Singh, Sh. , Bagri, J. , & Kumar, Y. K. , Yadav, L. (2024). Agricultural Waste Management.

3.Zargaran Khouzani, M. R. , Ghahfarokhi, Z. (2022). Evaluation of Agricultural Waste Management Mechanism in Iran. Industrial and Domestic Waste Management. 2. 113-124. 10.53623/idwm.v2i2.112.

4. Neri, A., Bernardi, B., Zimbalatti, G., & Benalia, S. (2023). An Overview of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Food Waste for Biomethane Production. *Energies*, *16*(19), 6851.

5. Dutta, Sh. , He, M. , Xiong, X. , Tsang D. C.W.. Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review, Bioresource Technology, 341(2021) 0960-8524.

6. Yang, M. , Elst, M. , Smets, I. ,Zhang, H. , Li, Sh. ,Baeyens, J. , Deng, Y. (2024). Reviewing Improved Anaerobic Digestion by Combined Pre-Treatment of Waste-Activated Sludge (WAS). Sustainability. 16. 6419. 10.3390/su16156419.

۷. روح اللهی، ز.،ابراهیمی نیک، م.ع. ، ابراهیمی،س.ه.،خجسته پور،م.(۲۰۱۶)تجزیه و تحلیل اقتصادی تولید برق از کود گاوی (مطالعه موردی: گاوداری ۳۲۵ راسی در مشهد) ، چهارمین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران.

8. Meratizaman, M. , Nateqi, M., Karami, M., Kananian, S. (2025). Technoeconomic analysis of pistachio waste utilization in combined heat and power systems in Iran. Discover Energy. 5. 10.1007/s43937-025-00085-5.

9. Safieddin Ardebili, S.M.,Green electricity generation potential from biogas produced by anaerobic digestion of farm animal waste and agriculture residues in Iran, Renewable Energy, 154(2020) Pages 29-37, 0960-1481.

۱۰.ذوالفقاری، ق. ،واعظی، ا .(1403) ظرفیت استحصال بیوگاز از فضولات دامی (مطالعه موردی: شهرستان جوین، استان خراسان رضوی)، *نشریه مطالعات علوم محیط زیست*، 9(3)، magiran.com/p2698495. 9225-9234

۱۱. وحیدی اضماره،ز.، و غائبی،ه . (۱۴۰۴). مروری بر فناوری بیوگاز در راستای مدیریت پسماند کشاورزی .نشریه انرژی های تجدیدپذیر و نو.12(2), 8-18. doi: 10.22034/jrenew.2025.218214