



تبدیل پسماندهای کشاورزی به سوخت جامد برای تأمین انرژی پایدار در مناطق روستایی

نادره تبریزی^{۱*}

^۱ مربی پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

چکیده

پسماندهای کشاورزی شامل کاه و کلش برنج، پوست و هسته میوه‌ها و بقایای محصولات زراعی و باغی هستند. این پسماندها در صورت مدیریت نادرست می‌توانند به منبع جدی آلودگی خاک، آب و هوا تبدیل شوند. این معضل در ایران به‌ویژه در استان‌های شمالی کشور (گیلان و مازندران)، شدت بیشتری دارد. سوزاندن کاه و کلش در مزارع موجب انتشار دود غلیظ و گازهای آلاینده در جو می‌شود. شست‌وشوی این ضایعات نیز سبب ورود مواد آلی و شیمیایی به رودخانه‌ها و آلودگی منابع آبی خواهد شد. در این مقاله، به روش تولید بریکت سوختی فشرده و قالبی از پسماندهای کشاورزی به عنوان منبع انرژی پایدار و کم‌دود در مصارف خانگی روستائی پرداخته شده است. یک کشاورز می‌تواند با تولید سوخت جامد، انرژی موردنیاز برای پخت‌وپز خانوار را تأمین کند و هم‌زمان تا ۵۰ درصد از میزان آلودگی محیطی بکاهد. این سیستم با ابزار ابتدایی مانند بشکه‌های پلاستیکی و لوله‌های ارزان‌قیمت قابل‌راه‌اندازی است.

واژگان کلیدی: انرژی پایدار، پسماند کشاورزی، سوخت جامد، کاهش آلودگی، گرمایش، مناطق روستائی



بیان مسئله

بخش کشاورزی ایران نقش مهمی در اقتصاد روستایی داشته و بیش از ۱۴ درصد تولید ناخالص داخلی را تأمین می‌کند. سالانه مقادیر عظیمی از بقایای سخت لیگنوسلولزی در بخش کشاورزی تولید می‌شود. این مواد غالباً به عنوان ضایعات، بی‌ارزش تلقی شده و به‌صورت سوزاندن در فضای باز از بین می‌روند. پوسته‌های پسته و گردو، ساقه گیاهان روغنی (کلزا، آفتابگردان، کنجد)، برگ‌ها و شاخه‌های درختان و تفاله حبوبات پتانسیل بالایی برای تبدیل به سوخت جامد دارند. عدم بهره‌برداری از این منابع، علاوه بر هدررفت انرژی، موجب آلودگی محیط زیست و از دست رفتن فرصت‌های اقتصادی می‌شود.

بر اساس آخرین برآوردها، پتانسیل تولید سالانه بقایای کشاورزی در ایران در حدود ۱۲۵ میلیون تُن تخمین زده می‌شود که از این میزان، بیش از ۸۱ میلیون تُن آن قابل جمع‌آوری است. عمده این بقایا شامل ساقه و برگ ذرت، شالی و پوسته برنج و بقایای سورگوم، جودوسر و چاودار، پوسته بادام‌زمینی، باگاس نیشکر، خاکاره و بقایای چوبی از جنگل‌ها یا صنایع چوب و ضایعات گیاهی سبز است. علاوه‌براین، سالانه بین ۵ تا ۷ میلیون تُن بقایای جنگلی در جنگل‌های هیرکانی و زاگرس تولید می‌شود که پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای مختلف از جمله تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌آورد (عزیزپناه و تاکی، ۲۰۲۵). با این حال، تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد این بقایا جمع‌آوری و استفاده می‌شوند و باقیمانده با روش‌های ناکارآمد دفع می‌گردند. سوزاندن بقایای کشاورزی در فضای باز، به‌ویژه در فصل برداشت، منجر به انتشار سالانه معادل ۱۰ تا ۱۵ میلیون تُن دی‌اکسید کربن و ذرات معلق شده و آلودگی هوا در استان‌های شمالی و مرکزی را به سطح بحرانی می‌رساند (آزادبخت و همکاران، ۲۰۲۳). در استان خوزستان، سوزاندن ۲ میلیون تُن بقایای نیشکر موجب افزایش شاخص آلودگی هوا به بیش از ۲۰۰ و افزایش هزینه‌های درمانی تا حدود ۵۰۰ میلیارد تومان در سال می‌شود. دفن مواد آلی مانند زباله، منجر به تخمیر بی‌هوازی و تولید متان می‌شود. از نظر اقتصادی، بهره‌برداری از این منابع می‌تواند بیش از ۱۰۰ هزار شغل مستقیم در زنجیره جمع‌آوری، فرآوری و توزیع ایجاد کرده و سالانه درآمدی بین ۲۰ تا ۳۰ هزار میلیارد تومان برای کشور فراهم کند.

معرفی دستورالعمل

تولید سوخت جامد (بریکت) از بقایای کشاورزی

کاه و کلش برنج، ساقه ذرت، پوسته خشک و بقایای چوبی، مواد اولیه مناسب برای تولید سوخت جامد هستند. با جمع‌آوری این بقایا در مزرعه، می‌توان آنها را به سوخت جامد فشرده به نام **بریکت** تبدیل کرد. این سوخت شبیه زغال فشرده است که در بخاری‌های زغالی، اجاق‌های روستائی و تنورهای نان‌پزی کاربرد دارد (شکل ۱). از حدود ۵۰ کیلوگرم کاه و ساقه می‌توان نزدیک به ۳۰ بریکت تولید کرد. این میزان به‌طور معمول انرژی لازم برای پخت‌وپز یا گرمایش یک خانوار را برای حدود یک هفته فراهم می‌کند. برای استفاده و روشن کردن بریکت کافی است کمی کاغذ یا هیزم خشک کنارش گذاشته شود تا آتش بگیرد. بریکت پس از روشن شدن، مانند زغال آرام می‌سوزد و حرارت مداوم تولید می‌کند. از مزایای استفاده از بریکت



تبدیل پسماندهای کشاورزی به سوخت جامد برای تأمین انرژی پایدار در مناطق روستایی/ نادره تبریزی

می‌توان به ایجاد دود کمتر (حدود ۴۰ درصد کمتر از هیزم)، حمل و ذخیره‌سازی راحت‌تر و ایجاد حرارت مداوم و یکنواخت اشاره کرد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۴). سوخت جامد از بقایای کشاورزی تولید می‌شود و بنابراین، نیازی به قطع درختان برای تولید آن نیست. مراحل تولید بریکت به شرح زیر است:

۱- ساخت قالب

ابتدا بقایای کشاورزی به قطعات کوچک‌تر (۵-۱۰ سانتی‌متر) خرد می‌شوند (شکل ۱). خردکردن می‌تواند با چاقو، داس یا خردکن‌های دستی انجام شود. با عملیات خردکردن، حجم بقایا کاهش یافته و سرعت تجزیه در هاضم دو برابر می‌شود. در مرحله بعد به ازاء هر ۹ کیلوگرم بقایای کشاورزی خردشده، حدود ۱ کیلوگرم خاک‌رُس یا نشاسته اضافه می‌شود. این مواد نقش چسب طبیعی را دارند و باعث می‌شوند بریکت بعد از خشک‌شدن محکم بماند. سپس، مقدار کمی آب (حدود یک سطل کوچک برای هر ۱۰ کیلوگرم مخلوط) اضافه کرده تا حالت خمیری به‌دست آید.

۲- قالب‌گیری و خشک‌کردن

از قالب چوبی یا فلزی به شکل استوانه‌ای یا مکعبی برای قالب‌گیری استفاده می‌شود. مخلوط خمیری را داخل قالب ریخته و با دست، یک ابزار فشار ساده یا حتی جک دستی مواد را محکم فشار داده تا آب اضافی خارج شود و توده فشرده و سفت، شکل بگیرد (شکل ۲). بعد از فشاردهی، بریکت‌ها از قالب خارج شده و روی زمین یا یک سطح توری به مدت ۲-۳ روز در فضای باز و معرض نور خورشید قرار داده تا کاملاً خشک شوند. عمل خشک‌شدن بریکت بسیار مهم است. بریکت مرطوب در هنگام سوختن، دود زیادی تولید کرده و شعله نمی‌گیرد.

استفاده از باقیمانده‌های حاصل از سوخت بریکت و پایش مداوم باقیمانده‌های حاصل از سوخت بریکت می‌توانند به عنوان یک کود آلی غنی به خاک بازگردانده شوند. استفاده از این باقیمانده‌های آلی، بسته به نوع زیست‌توده و شرایط خاک، موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شده و می‌تواند عملکرد محصول را در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش دهد (تیونگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). کشاورزان لازم است ماهانه وضعیت محیط اطراف (خاک، آب‌وهوا) را بررسی کنند. این کار می‌تواند با آزمایش‌های ساده pH خاک یا مشاهده تغییر رنگ یا بوی آب و بررسی رشد گیاهان، صورت گیرد. اگر میزان آلودگی کاهش نیافته باشد، باید تنظیمات لازم مانند تمیزکردن مخزن یا بهبود تهویه انجام شود.

¹ Tiong



شکل ۱- فرآیند تولید بریکت از بقایای کشاورزی. بقایای ساقه‌های سورگوم و برنج (الف)؛ بقایای پوسته بادام‌زمینی (ب)؛ کاهش اندازه بقایا (پ)؛ کریونیزاسیون (زغال‌سازی بقایا) در دمای کنترل‌شده (ت)؛ بریکت‌سازی (ث)؛ الک‌کردن (ج)



شکل ۲- بریکت تولیدشده از بقایای کشاورزی

تبدیل پسماندهای کشاورزی به سوخت جامد برای تأمین انرژی پایدار در مناطق روستایی/ نادره تبریزی

بریکت‌سازی با خمیر رقیق و قالب متخلخل

برای بریکت‌سازی با خمیر رقیق باید از مواد آلی قابل احتراق فاقد هرگونه رنگ، پوشش پلاستیکی یا تیمارهای شیمیایی استفاده شود. وجود مواد رنگ‌دار، پلیمرها یا چوب‌های آغشته‌شده به مواد حفاظتی منجر به تولید دود و پسماندهای غیربهداشتی در حین فرآیند حرارتی می‌شود. باید توجه داشت که مواد دارای میزان بالای سیلیس، مانند پوسته برنج، ماهیتی ساینده دارند و تماس مستمر آنها با تجهیزات فشرده‌سازی می‌تواند موجب افزایش نرخ فرسایش قطعات فلزی یا قالب‌ها شود. برای بریکت‌سازی با خمیر رقیق نیاز به مواد و ابزار به شرح زیر است:

مواد سوختنی: خاکاره، خاکِ چوب، کاه، کلش و ساقه‌های خُردشده، بقایای گیاهی.

کاغذ باطله (روزنامه، مقوا): برای تهیه خمیر یا گرد زغال.

قالب ساده: لوله پی‌وی‌سی یا لوله فاضلاب بُرش‌خورده، یا قالب فلزی/ چوبی، دو دیسک (کف و پیستون) از تخته برای درپوش پیستون.

پرس: پرس کارگاهی، پرس سینی‌دار، پرس میز یا حتی پرس دستی و پرس بیلچه‌ای.

سایر: آب، ظرف بزرگ، مخلوط‌کن دستی، مته با هم‌زن یا ماله برای هم‌زدن.

۱- خردکردن و یکنواخت‌سازی اندازه

کاه، ساقه یا کاه برنج را با داس یا آسیاب دستی برش دهید تا ذرات ۶-۱۰ میلی‌متر شوند. خاکاره نیازی به خردکردن ندارد. این مرحله کیفیت و دوام بریکت را تعیین می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳- خردکردن و یکنواخت‌سازی ساقه‌های خشکیده با خاکاره

۲- تهیه خمیر کاغذ

در این مرحله، کاغذ باطله، پاره یا به‌صورت نوارهای کوچک ریز می‌شود (شکل ۴). سپس در یک ظرف بزرگ به کاغذها آب اضافه شده تا خیس شوند. زمان خیساندن در صورت استفاده از آب گرم، ۱۵-۵ دقیقه و برای آب سرد، ۶۰-۳۰ دقیقه است. با استفاده از مخلوط‌کن دستی یا چوب، مخلوط به حالت خمیر رقیق کرم‌مانند در می‌آید.



شکل ۴- کاغذهای باطله برای تهیه خمیر برای تولید سوخت جامد

۳- مخلوط سازی

نسبت مناسب برای تهیه مخلوط، دو واحد حجمی خاکاره و یک واحد حجمی خمیر کاغذ است. خاکاره با خمیر کاغذ موجود در ظرف مخلوط می شود. آب به مقداری اضافه می شود که مخلوط از نظر بافت، قابلیت هم زدن و یکنواخت سازی توسط مخلوط کن را داشته باشد. در صورتی که مواد با اندازه درشت تر (قطعات ساقه) در ترکیب وجود داشته باشند، پیش از افزودن به مخلوط، این مواد خرد یا در آب مرطوب می شوند، تا قابلیت اختلاط فراهم شود.

۴- ساخت قالب پلاستیکی

قطعه ای از لوله پی وی سی یا لوله فاضلاب با قطر تقریبی ۱۵ سانتی متر و طول ۲۰ تا ۳۰ سانتی متر بریده می شود. روی بدنه لوله، مجموعه ای از سوراخ های ریز ایجاد می گردد تا امکان خروج آب در مرحله فشرده سازی فراهم شود. برای ساخت قالب، نیاز به دو دیسک چوبی است. دیسک پایینی (کف قالب)، باید مطابق با قطر بیرونی لوله ساخته شود تا لوله روی آن ثابت بماند. دیسک بالایی (پستون)، با قطری کمی کمتر از قطر داخلی لوله ساخته می شود تا امکان حرکت خطی آن درون لوله برای فشرده سازی فراهم شود (شکل ۵).



شکل ۵- ساخت قالب پلاستیکی

تبدیل پسماندهای کشاورزی به سوخت جامد برای تأمین انرژی پایدار در مناطق روستایی/ نادره تبریزی

۵- فشردن خمیر

برای تهیه بریکت از مخلوط پالپ و خاکاره، ابتدا قالب روی صفحه پایه قرار می‌گیرد. سپس قالب تا حدود نیمه تا سه‌چهارم حجم خود با خمیر آماده‌شده پُر شده و سطح آن صاف می‌شود. در مرحله بعد، پیستون در جای خود قرار گرفته و با استفاده از پرس دستی یا پرس رومیزی، فشاری یکنواخت وارد می‌شود تا آب اضافی از مخلوط خارج شود (شکل ۶). سپس، قالب وارونه شده و بریکت با یک ضربه ملایم یا به کمک سازوکار خروجی دستگاه از قالب جدا می‌شود. با این روش، در شرایط معمول می‌توان هر ۳۰ تا ۴۰ ثانیه یک بریکت تولید کرد و از هر نوبت آماده‌سازی خمیر، به‌طور متوسط حدود ۱۵ بریکت به‌دست می‌آید.



شکل ۶- مراحل فشردن خمیر حاصل از ضایعات برای تولید بریکت

۶- خشک کردن بریکت

پس از قالب‌گیری، بریکت‌های تازه روی سطحی صاف یا قفسه‌هایی با جریان هوای مناسب در آفتاب یا سایه دارای تهویه قرار داده می‌شوند. در صورت احتمال بارندگی، می‌توان آنها را با پارچه یا ورق پلاستیکی پوشاند. پس از آن‌که بریکت‌ها تا حدی خشک شدند، بهتر است برای تکمیل فرآیند خشک کردن به فضای سرپوشیده یا انبار منتقل شوند (شکل ۷). مدت زمان خشک شدن بسته به شرایط آب‌وهوایی متغیر است و معمولاً بین چند روز تا حدود یک هفته طول می‌کشد.



شکل ۷- خشک کردن بریکت‌ها

بریکت‌های خشک‌شده در محیط‌های سرپوشیده و دور از رطوبت، بیشترین پایداری و کیفیت سوختی را دارند. در فضاهای بسته، دود حاصل از سوختن بریکت‌ها می‌تواند غلیظ باشد. استفاده از اجاق‌های دارای خروج دود یا محیط‌های دارای تهویه در فضاهای بسته موجب کاهش تجمع دود می‌شود.

تنظیم فرآیند و عیب‌یابی ساده

خُردشدن بریکت: اگر مقدار خمیر در مخلوط کم باشد، امکان خُردشدن بریکت‌ها وجود دارد. افزایش سهم خمیر نسبت به خاک‌اره یا طولانی‌تریودن مرحله پرس، استحکام بریکت را بیشتر می‌کند. در نمونه‌هایی که خاک‌اره بسیار ریز است، نیاز به استفاده از خمیر بیشتری در فرمول است.

مرطوب‌ماندن بریکت: اگر پس از قالب‌گیری، بریکت هم‌چنان خیس بماند، معمولاً فشار کافی در زمان پرس اعمال نشده یا مرحله خشک‌کردن کامل نشده است. افزایش فشار یا طولانی‌ترشدن خشک‌کردن، رطوبت نهایی را کاهش می‌دهد. ایجاد بوی نامطلوب یا دود زیاد: وجود مواد ناخالص غیرقابل‌سوزاندن در مخلوط می‌تواند منجر به تولید بوی بد یا دود سنگین شود. در این شرایط لازم است ترکیب مواد اولیه دوباره بررسی و اصلاح شود.

توصیه ترویجی (جمع‌بندی)

پسماندهای کشاورزی (کاه و ساقه غلات، پوست پسته، گردو و بادام، برگ‌ها و باقیمانده‌های شاخه‌ای درختان)، قابلیت تبدیل به بریکت‌های سوختی را دارند و می‌توانند به تأمین انرژی پایدار خانوارهای روستایی کمک کنند. با توجه به قیمت کاه (حدود ۱۱۵۰۰ تومان به ازاء هر کیلوگرم)، فروش مستقیم آن برای کشاورز در مقایسه با تولید بریکت و زغال اقتصادی‌تر



تبدیل پسماندهای کشاورزی به سوخت جامد برای تأمین انرژی پایدار در مناطق روستایی/ نادره تبریزی

است. درآمد حاصل از فروش ۱ تن کاه نزدیک به ۱۲ میلیون تومان است، در حالی که هزینه تولید بریکت و زغال از همان مقدار کاه، حتی با فناوری کم‌هزینه، تنها صرفه‌جویی حدود ۹ میلیون تومانی ایجاد می‌کند. با این حال، سایر پسماندهای کشاورزی که معمولاً رها می‌شوند، اغلب بازار فروش مشخصی ندارند و سوزاندن مستقیم آنها می‌تواند محیط زیست را آلوده کند. در این موارد، تبدیل به بریکت یا زغال، راهکاری عملی و کم‌هزینه برای مدیریت این پسماندها محسوب می‌شود. با تولید سوخت جامد از بقایای کشاورزی، آلودگی هوا و آب بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش یافته و کشاورزان انرژی پاک و رایگان برای پخت‌وپز و گرمایش به‌دست می‌آورند. از طرفی، هزینه‌های دفع زباله کاهش یافته و حتی منبع درآمدی جدید از فروش کود یا بریکت ایجاد می‌شود.

فهرست منابع

- ۱- قربانی، محمد، حسین اسدی و سپیده ابریشم‌کش. ۱۳۹۴. تأثیر بیوجار (زغال زیستی) پوسته شلتوک برنج بر آبشویی نیترات در یک خاک رسی. پژوهش‌های خاک، ۲۹ (۴)، ص ۱۲۷-۱۳۴.
2. Azadbakht, M., S.M. Safieddin Ardebili and M. Rahmani. 2023. Potential for the production of biofuels from agricultural waste, livestock, and slaughterhouse waste in Golestan province, Iran. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13: 3123-3133.
3. Azizpanah, A. and M. Taki. 2025. Quantifying bioenergy potential and environmental impacts of agricultural residues: A comparative analysis with global benchmarks. *PLOS ONE*, 20: e0333492.
4. Tiong, Y.W., P. Sharma, S. Xu, J. Bu, S. An, J.B.L. Foo and Y.W. Tong. 2024. Enhancing sustainable crop cultivation: The impact of renewable soil amendments and digestate fertilizer on crop growth and nutrient composition. *Environmental Pollution*, 342: 123132.