

## بررسی کیفیت پسماندهای کشاورزی به عنوان سوخت جامد در تولید انرژی

معصومه امیری<sup>۱</sup>، آرش نجفی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

masume\_amiri88@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

arash\_najafi@hotmail.com

**چکیده:** پایان پذیری سوخت‌های فسیلی و خسارت‌های زیست‌محیطی آن‌ها منجر به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله زیست‌توده شده است. پسماندهای کشاورزی از منابع بزرگ زیست‌توده هستند که در این مطالعه امکان استفاده از پسماندهای کشاورزی استان اردبیل به عنوان سوخت در محفظه‌های احتراقی بررسی شده است. با مطالعه و بررسی همه محصولات کشاورزی تولیدی استان اردبیل، دو نمونه کاه‌گندم و جو به علت زیاد تولید و ارزش غذایی کم و پسماند زیاد به عنوان نمونه انتخاب شدند و آنالیزهای عنصری و خاکستر حاصل از احتراق، کاه‌گندم و جو، با استفاده از محدوده‌های استاندارد مقایسه و مشکل‌های فنی و زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها تحلیل شده است. همچنین با استفاده از آنالیز توزین حرارتی، رفتار احتراقی نمونه‌ها تحلیل و شاخص‌های احتراقی و سینتیک آن‌ها به دست آمدند. مقدار کلرو گوگرد در هر دو نمونه کاه‌جو و گندم، بالاتر از مقدار مجاز ۰/۱ درصد است که منجر به پدیده خوردگی و انتشار آلاینده‌ها می‌شود. مقدار نیتروژن بالاتر از مقدار مجاز ۰/۷ است که منجر به انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌شود. نمونه کاه‌گندم نسبت به کاه‌جو شاخص احتراق و اشتعال پذیری بیشتر و در نتیجه، دمای پیک و زمان حداکثر نرخ احتراق و دمای پایان احتراق کمتر، اما حداکثر نرخ احتراقی بیشتر و در نتیجه، واکنش پذیری بیشتری دارد. انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانسی نمونه کاه‌جو در مرحله احتراقی زغالی شدن بیشتر از گندم است. هر دو نمونه برای استفاده مستقیم به عنوان سوخت مطلوب نیستند و نیاز به انجام برخی فرایندهای اصلاحی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** زیست‌توده، پسماندهای کشاورزی، احتراق، آنالیزهای سوخت، سینتیک سوخت، انرژی تجدیدپذیر.

کردند [۱۰].

مک کنری به مطالعه آنالیز توزین حرارتی زیست‌توده‌های مختلف و مقایسه سیستیک واکنش آن‌ها در محیط خشتی (گاز نیتروژن) و اکسیژن پرداخته است، سیستیک و انرژی فعال‌سازی آن‌ها را براساس معادله آرنیوس<sup>۲</sup> که توسط تعداد زیادی از محققان، از جمله مین و همکاران، هیو و همکاران، ژانگ و همکاران و ویلامز استفاده شده، به‌دست آورده است [۱۱]. ساید داوود و همکاران رفتار احتراقی زیست‌توده‌های مورد مطالعه خود را تحت شرایط جو اکسیدی با غلظت اکسیژن ۱٪ و ۳٪ را به‌وسیله آنالیز توزین حرارتی مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای احتراقی را با استفاده از نسبت مونواکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن که با استفاده از آنالیز شیمیایی FTIR<sup>۳</sup> به‌دست آوردند، مقایسه کرده و با استفاده از این آنالیز پارامترهای سیستیک را از روش بلزک<sup>۴</sup> به‌دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که نرخ کاهش وزن برای همه زیست‌توده‌ها با افزایش دما و درصد تبدیل زیست‌توده افزایش می‌یابد [۹، ۱۲ و ۱۳].

وانگ و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی مشخصات احتراقی کاه گندم در اثر مجاورت کاتالیست‌ها و تأثیر آن‌ها را بر آسان‌سازی آزاد شدن مواد فرار از کاه گندم و مشخصه‌های سیستیک با استفاده از آنالیز توزین حرارتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که احتراق کاه گندم می‌تواند شامل دو مرحله باشد: یکی انتشار مواد فرار و دیگری احتراق مواد فرار باقی‌مانده و کربن تثبیت‌شده است. وجود کاتالیزور باعث افزایش انتشار مواد فرار در مرحله اول احتراقی می‌شود و حداکثر شدت از دست دادن جرم در دمای پایین‌تر، از حالت بدون کاتالیز رخ می‌دهد. در مرحله دوم احتراقی کاتالیزور به‌عنوان حامل اکسیژن عمل می‌کند و اکسیژن مورد نیاز زغال را به راحتی تأمین می‌کند. بنابراین افزودن کاتالیزور می‌تواند باعث احتراق کامل کاه گندم شود و انرژی را در یک زمان کوتاه منتشر کند [۱۰].

کوک و همکاران از آنالیز توزین حرارتی تحت شرایط جو اکسیدی برای بررسی رفتار احتراقی میس کانتوس<sup>۵</sup> و پاپلار<sup>۶</sup> (هر دو گیاه، درختچه‌هایی با چرخه عمر کوتاه هستند) سبوس برنج و تعیین مراحل احتراقی آن‌ها استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که احتراق سوخت‌های زیست‌توده در دو مرحله رخ می‌دهد: مرحله اول احتراق مواد فرار و دومی کربن تثبیت‌شده است، واکنش‌پذیری سوخت‌های زیست‌توده مربوط به انتشار مواد فرار، انتشار انرژی به احتراق کربن تثبیت‌شده آن بستگی دارد [۹]. امره اوزگور و همکاران با انجام تست‌های احتراقی نمونه‌های میس کانتوس و پاپلار، به مطالعه شاخص‌های احتراقی

در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ از جمله منابع انرژی اولیه در جهان هستند (حدود ۸۰ درصد از مصرف کل جهان) و خسارت‌های جهانی ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای از سوخت‌های فسیلی، منجر به افزایش دمای هوا شده است. میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از منابع مختلف در ایران، محدوده تصویب‌شده توسط پروتکل کیوتو را گذرانده و به‌عنوان دهمین کشور تولیدکننده دی‌اکسیدکربن در سراسر جهان معرفی شده است. بنابراین، کنترل مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش ذخایر این سوخت‌ها به‌عنوان یک چالش جدید در مدیریت انرژی ایران تبدیل شده است. از این‌رو کشور ایران درصدد تنوع بخشی به منابع انرژی خود، به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله زیست‌توده روی آورده است.

نوع سوخت زیست‌توده و مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی آن بر کل فرایند احتراق تأثیر می‌گذارد (سیستم احتراق، انتشار آلاینده‌های جامد و گازی، منبع سوخت) لذا می‌توان به‌کمک این مشخصه‌ها، خواص، کیفیت، پتانسیل برنامه‌های کاربردی و مشکل‌های زیست‌محیطی هر سوخت را تعیین کرد. آنالیز کلی تعیین‌کننده درصد مواد فرار، رطوبت، خاکستر [۱] و آنالیز عنصری مقدار عنصرهای کربن، اکسیژن، گوگرد، کلر، نیتروژن، هیدروژن را در زیست‌توده تعیین می‌کند [۲-۵]. پس از آن، آنالیز خاکستر [۴] برای تعیین امکان بهره‌برداری از خاکستر و پیش‌بینی ایجاد مشکل‌های فنی در سیستم‌های احتراقی همانند خوردگی، رسوب خاکستر، انباشتگی و رفع این مشکل‌ها [۳، ۶، ۷] و آنالیز توزین حرارتی برای بررسی رفتار احتراقی زیست‌توده به‌کار می‌رود [۵]. تعیین ویژگی‌های فیزیکی همانند ارزش حرارتی، چگالی‌توده‌ای نیز از دیگر آنالیزهای مهم سوخت زیست‌توده‌اند [۳].

جنکینز و همکاران با استفاده از آنالیز توزین حرارتی و بررسی رفتار احتراقی زیست‌توده، به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های زیست‌توده شسته‌شده (از جمله روش‌های کاهش فلزات قلبایی در زیست‌توده است [۸]) نسبت به نمونه‌های شسته‌نشده، انرژی فعال‌سازی کمتر و عامل فرکانس کوچک‌تر و در نتیجه واکنش‌پذیری کمتری دارند. کوک و همکاران از آنالیز توزین حرارتی برای بررسی رفتار احتراقی، تعیین منطقه‌های واکنشی، مکانیزم اثر افزودنی‌های فلزی، درصد خاک رس بر روی سیستیک سوخت‌های فسیلی مختلف استفاده کردند [۹]. وانگ رفتار و مشخصه‌ها و شاخص‌های احتراقی کاه گندم کوفایر<sup>۱</sup> شده (به روش مخلوط کردن زیست‌توده با یک سوخت فسیلی یا یک زیست‌توده دیگر تلقی می‌شود) با زغال‌سنگ را با استفاده از آنالیز توزین حرارتی بررسی

2. Arrhenius

3. Fourier Transform Infrared Spectroscopy

4. Blazek

5. Misconthus

6. Poplar

عنصرها بر کیفیت احتراق نمونه‌ها پرداخته شده است. به کمک آنالیز TG می‌توان رفتار احتراقی و همچنین سینتیک نمونه‌ها و ساختار زیست‌توده‌ها را بررسی کرد و با استفاده از آنالیز CHNS می‌توان تأثیر مقدار این عنصرها را در انتشار آلاینده‌های احتراقی و کیفیت احتراق بررسی نمود. نیز با استفاده از آنالیز XRF، خاکستر حاصل از احتراق زیست‌توده‌ها، می‌توان تأثیر عنصرهای موجود در آن را در بستر احتراق و مشکل‌های ناشی از آن‌ها را پیش‌بینی کرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

پسماندهای کشاورزی مطالعه‌شده در این مقاله، کاه گندم و جو است که پس از بررسی محصولات کشاورزی تولیدی در استان اردبیل و با مشورت جهاد کشاورزی این استان، با رعایت نکات فنی انتخاب شدند. این نکات عبارت‌اند از: ۱. ضایعات کشاورزی محسوب شود؛ ۲. ضایعات حاصل از آن زیاد باشد؛ ۳. به‌عنوان خوراک دام استفاده نشود؛ ۴. در ساخت کمپوست کاربرد نداشته باشد. ذرات درشت خاک و سنگ از نمونه‌ها جدا شده و با استفاده از آسیاب ساخت شرکت ایران خودساز، آسیاب و سپس از الک آزمایشگاهی ساخت شرکت دماوند با استاندارد ASTM E11<sup>۴</sup> و مش شصت عبور داده شدند و در محیطی کاملاً خشک و بدون رطوبت نگهداری شدند.

برای آنالیز عنصری نمونه‌ها از سیستم احتراق عنصری Costech4010 ساخت کشور ایتالیا و برای آنالیز حرارتی از دستگاه TG ساخت کشور آلمان مدل IRIS 209 FINETZSCH که نمونه‌ها از دمای ۲۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با گام حرارتی ۱۰ درجه کلوین بر دقیقه در محیط هوا قرار داده شدند، آنالیز عنصری خاکستر توسط دستگاه XRF ساخت کمپانی PHILIPS مدل PW1480 که در آن، نمونه‌های پودری آماده‌شده به شکل قرص پرس درآمده و برای آنالیز استفاده‌شده، حداکثر خطای نسبی این روش، حدود ۵٪ گزارش شده است.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱. تأثیر غلظت عنصرهای موجود در کاه جو و گندم

#### در فرایند احتراق

نتیجه به‌دست‌آمده از آنالیز عنصری زیست‌توده‌های کاه جو و گندم در

و مراحل احتراقی و تأثیر نرخ حرارتی و عنصرهای موجود در زیست‌توده خام بر روی رفتار احتراقی آن‌ها پرداختند و به بررسی نمودارهای حاصل از آنالیز حرارتی نمونه‌های زیست‌توده در نرخ احتراقی مختلف، عملکرد و قابلیت احتراقی میس کانتوس و پاپلار پرداختند. [۱۲].

جنکینز و همکاران و خان و همکاران به‌کمک آنالیز عنصری خاکستر و زیست‌توده خام به مطالعه تأثیر ترکیب‌های غیرآلی خاکستر و واکنش‌های نامطلوب آن‌ها در بستر احتراق دیگ‌های بخار (نوعی از دیگ‌های بخار که ذرات ریز سوخت به کمک هوایی که از بخش زیرین بستر مشبک احتراق دمیده می‌شود، به شکل سیالی شده در می‌آید و احتراق به‌کمک مشعل‌های تعبیه‌شده در دیگ بخار صورت می‌گیرد) در تشکیل رسوب خوردگی، پرداختند و پیشنهادهایی برای کاهش اثرات زیان بار آن‌ها ارائه کردند [۳ و ۱۳]. آی هان دمیریاس با استفاده از نتایج حاصل آنالیز خاکستر، تأثیر عنصرهای موجود در خاکستر زیست‌توده را در تشکیل رسوب خوردگی، در محفظه احتراقی مطالعه کرده و به این نتیجه رسیده است که عنصرهای کلر و عناصر پتاسیم، سلیسیم، سدیم، گوگرد، کلر، کلسیم، منیزیم در طی واکنش‌های پیچیده‌ای ممکن است منجر به رسوب خاکستر در محفظه احتراقی شوند و کلر عامل اصلی خوردگی در محفظه احتراقی است و رسوب خاکستر باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود و در درجه حرارت‌های بالا ممکن است موجب خوردگی شدید محفظه احتراقی شود [۱۴].

تائو و همکاران از طیف‌سنج مادون قرمز به‌عنوان یک روش جایگزین برای پیش‌بینی درصد عنصرهای کربن، هیدروژن و نیتروژن کاه استفاده کردند و با مقایسه نتیجه‌های حاصل از روش‌های دیگر متوجه شدند که این روش صحت قابل‌قبولی دارد و برای کاربردهای مهندسی مطلوب است [۱۵]. ژئی آو سان و همکاران به مطالعه تجربی احتراق ساقه پنبه و تأثیر افزودن آلومینا و سیلیکا در مخلوط ساقه پنبه (به‌عنوان سوخت) در کوره دیگ بخار با خوراک‌دهی سوخت به‌صورت بستر سیالی‌شده پرداختند [۱۶]. دیگر محققان شامل دمیر باس و هیگیری اکمال و مک کنزی در سال ۲۰۰۲، این آنالیزها را برای زیست‌توده‌های مختلفی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که متغیرهای احتراقی در سوخت‌های زیست‌توده، خیلی متفاوت‌تر از زغال‌سنگ است. سنکا وایگ بودین و همکاران نیز با استفاده از این آنالیزها به مطالعه بازیافت و مدیریت خاکستر حاصل از احتراق زیست‌توده پرداختند [۱۷].

از این‌رو در این مطالعه، با استفاده از آنالیزهای دستگاهی TG<sup>۱</sup>،

CHNS<sup>۲</sup> و XRF<sup>۳</sup> نمونه‌های انتخاب‌شده به بررسی رفتار احتراقی و تأثیر

1. Thermogravimetric Analysis  
2. Elemental Analysis  
3. X-ray fluorescence

4. American Society for Testing and Materials

### ۲.۳. تأثیر عنصرهای تشکیل دهنده خاکستر زیست توده بر کیفیت احتراق

نتیجه به دست آمده از آنالیز عنصری خاکستر (XRF) زیست توده کاه جو و گندم در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): آنالیز عنصری خاکستر زیست توده جو، گندم (بر حسب درصد وزنی)		
نوع زیست توده	کاه جو	کاه گندم
آنالیز عنصری خاکستر		
آلومینیوم	۱	۰/۱۳۲۳
آهن	۰/۹۸۶۲	۰/۱۳۹۸
پتاسیم	۱/۶۰۲۲	۲/۴۴۸۹
تیتانیوم	۰/۰۸۸۷	۰/۰۱۱۹
سیلیسیم	۶/۸۵۷۳	۳/۲۰۱۹
سدیم	۰/۰۴۴۵	۰/۰۱۴۸
فسفر	۰/۱۰۳۹	۰/۱۸۶۸
کلر	۰/۷۴	۱/۶۵
کلسیم	۲/۱۲۰۵	۰/۵۵۷۵
گوگرد	۰/۱۶۶۲	۰/۲۶۱۵
منیزیم	۰/۵۳۶۷	۰/۰۱۴۸
منگنز	۰/۰۴۴۱	۰/۰۰۳۳

ترکیب‌های سازنده زیست توده خام و خاکستر حاصل از آن در بستر و محفظه احتراق، مشکل‌هایی ایجاد می‌کنند و عوامل مختلفی باعث تشدید این اثرها می‌شوند. این تأثیرها در مواقعی می‌تواند منجر به تعطیلی واحد مورد نظر و بسیاری از مشکل‌های فنی شوند [۳ و ۴]. مهم‌ترین این مشکل‌ها عبارت‌اند از: رسوب خاکستر، خوردگی و انباشتگی. مکانیزم تشکیل رسوب و خوردگی در دیگ‌های بخار زیست توده را می‌توان در سه دسته تقسیم کرد [۳]:

۱. حاصل از ذرات گازی: واکنش‌های شیمیایی پیچیده گوگرد، سیلیسیم، کلر و فلزات قلیایی می‌تواند باعث رسوب و خوردگی‌های شدید شوند. کلر نقش بسیار مهمی در تشکیل سیلیکات قلیایی دارد و باعث افزایش نوسان‌های فلزات قلیایی و افزایش انتشار آن‌ها به صورت کلریدهای قلیایی و هیدروکسیدها در فاز گازی می‌شود. این ترکیب‌های قلیایی زمانی که گازهای احتراقی در اثر جریان‌های همرفتی سرد می‌شوند، بر روی لوله‌های سوپرهیتر انباشته می‌شوند، سپس با دی‌اکسید گوگرد واکنش داده و ترکیب‌های گوگرد بر روی سطوح فلزی تشکیل می‌شوند و پوشش چسبنده‌ای را بر روی سطوح فلزی ایجاد می‌کنند که منجر به افزایش انباشتگی و رسوب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در سوخت‌هایی که نسبت مولی گوگرد به کلر

جدول (۱) آورده شده است. با استفاده از مقادیرها و محدوده‌های مجاز و استاندارد ارائه شده برای عنصرهای موجود در زیست توده خام و خاکستر حاصل از آن در محفظه‌های احتراقی [۴، ۱۸ و ۱۹]، کیفیت زیست توده‌های کاه جو و گندم بررسی شده است.

جدول (۱): آنالیز عنصری کاه جو و گندم (بر حسب درصد وزنی)					
زیست توده	کربن (%)	هیدروژن (%)	نیتروژن (%)	گوگرد (%)	اکسیژن (%)
کاه جو	۸۴/۵۷	۹/۲۵	۲	۲/۰۵	۲/۱۳
کاه گندم	۳۸/۸۲	۵/۲۱	۰/۹	۱/۱۶	۵۳/۹۱

۱. به کمک روش انفصال<sup>۱</sup> به دست آمده است [۲۰].

کربن، هیدروژن و اکسیژن اجزای اصلی سوخت‌های زیست توده هستند. کربن و هیدروژن در طی احتراق توسط واکنش‌هایی به شکل دی‌اکسید کربن و آب اکسید می‌شوند و اکسیژن موجود در سوخت در اثر تجزیه حرارتی آزاد شده و قسمتی از اکسیژن مورد نیاز برای واکنش‌های احتراقی را تأمین می‌کند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که تشکیل اکسیدهای نیتروژن در طول فرایندهای احتراقی زیست توده در دمای بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در نتیجه پیوند نیتروژن در سوخت است. در نمونه‌های کاه، نیتروژن موجود در سوخت‌هایی با مقدار بالای ۰/۶ درصد، منجر به انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌شوند. با توجه به جدول (۱)، مقدار نیتروژن موجود در کاه گندم و جو ۰/۹ و ۲ درصد است که احتراق آن‌ها می‌تواند منجر به انتشار اکسیدهای نیتروژن شود.

در طول فرایند احتراق فرم ترکیبی گوگرد، دی‌اکسید گوگرد و سولفات‌های قلیایی است و بر طبق برآیندها بیشترین قسمت گوگرد تمایل به فاز بخار دارد. اهمیت گوگرد فقط مربوط به انتشار دی‌اکسید گوگرد نیست، بلکه نقش گوگرد در فرایندهای خوردگی است [۳ و ۴]. مشکل‌های مربوط به انتشار عنصر گوگرد به صورت دی‌اکسید گوگرد در زیست توده‌های کاه با مقدار بالای ۰/۲ درصد است و اگر مقدار گوگرد در آن‌ها بالاتر از ۰/۱ درصد باشد، می‌تواند منجر به فرآیند خوردگی در محفظه احتراقی شود [۲۱]. بر طبق جدول (۱)، گوگرد هر دو نمونه کاه گندم و جو بالای ۰/۱ و ۰/۲ درصد است، بنابراین به ترتیب احتراق آن‌ها می‌تواند باعث مشکلات خوردگی و انتشار آلاینده‌های اکسیدهای گوگرد شود.

سیلیسیم، کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم، فسفر بیشترین عناصر تشکیل دهنده خاکسترند. منیزیم، فسفر، پتاسیم مربوط به مواد مغذی و کلسیم مربوط به آهک موجود در زیست توده است. این عناصر در بهره‌برداری خاکستر به‌عنوان کود شیمیایی با توجه به افزودنی‌های شیمیایی موجود در خاکستر، در رشد گیاه و عملیات پردازش سوخت اهمیت دارند [۳ و ۴]. مشکل‌های مربوط به ذوب خاکستر و خوردگی و رسوب زمانی رخ می‌دهد که غلظت کلسیم کمتر از ۱۵ درصد و مقدار پتاسیم بیشتر از ۷ درصد وزنی باشد، با توجه به جدول (۲) مقدار کلسیم در نمونه‌های کاه گندم و جو کمتر از ۱۵ درصد و مقدار پتاسیم آن‌ها کمتر از ۷ درصد است، بنابراین مشکل‌های مربوط به آن‌ها را در پی نخواهد داشت [۴].

مشکل‌های ناشی از خوردگی محفظه احتراق و انتشار هیدروکلریک اسید و دی‌اکسیدها<sup>۳</sup> (به گروهی از ترکیب‌های آلی کلر اطلاق می‌شود که اغلب آن‌ها در پروسه سوزاندن تولید می‌شوند. اساس مولکولی دی‌اکسید دو حلقه بنزن با ۲ پل اکسیژن است)، بر اثر کلر موجود در سوخت‌ها گاهی به ترتیب، زمانی رخ می‌دهد که درصد کلر بیشتر از ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۳ درصد باشد. مقدار کلر موجود در نمونه‌های کاه جو و گندم بر طبق جدول (۲) بالاتر از محدوده مجاز است. کلر موجود در کاه گندم تقریباً ۲/۳ برابر کاه جو است، بنابراین مشکل‌های ناشی از آن بیشتر خواهد بود. مقدار سیلیسیم، منیزیم و سدیم موجود در سوخت‌های کاهی بر طبق جدول (۲) خارج از محدوده مجاز است. این محدوده برای عنصرهای ذکر شده به ترتیب (۱/۹۳-۰/۹)، (۰/۱۰۳-۰/۰۶۳)، (۰/۰۱۲-۰/۰۱) درصد وزنی است، که در نمونه جو به ترتیب تقریباً ۲، ۲/۵ و ۳ برابر نمونه کاه گندم است، در نتیجه اثرات منفی حاصل از احتراق کاه جو بیشتر از کاه گندم خواهد بود.

### ۳.۳. نتایج آنالیز توزین حرارتی

نتیجه به‌دست آمده از آنالیز توزین حرارتی نمونه‌های کاه گندم و جو به شرح شکل (۱) و (۲) است.

آن‌ها کمتر از دو باشد، کلر به‌طور عمده عامل ایجاد خوردگی است [۳ و ۴]. در نمونه‌های مورد بررسی این نسبت مولی کمتر از دو است و به ترتیب برای کاه جو و گندم ۰/۲۵ و ۰/۱۸ است. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که کلر عامل اصلی ایجاد خوردگی در بستر احتراق آن‌ها باشد.

۲. حاصل از فاز جامد: ترکیب‌های غیر فرار در اثر ذوب شدن و به‌هم‌آمیختگی، موجب ایجاد رسوب می‌شوند. این ترکیب‌ها به‌طور عمده، گونه‌های معدنی مقاوم از قبیل سیلیسیم، منیزیم، کلسیم و مقادیر کمی ترکیب‌های فرار همانند آلومینیوم، سدیم و پتاسیم هستند. بخش قابل توجهی از این خاکستر در بستر احتراقی باقی می‌ماند و بقیه آن توسط ذرات معلق خاکستر<sup>۱</sup> با اندازه کوچک از طریق گاز دودکش انتقال می‌یابد. ذرات درشت‌تر ذرات معلق خاکستر بر روی سطوح مبدل حرارتی رسوب می‌کند و علت رسوب آن‌ها اساساً مربوط به کلسیم و دیگر مواد غیر فرار در رسوب است. بیشتر مواقع پتاسیم در ترکیب با فلزات قلیایی خاکی مانند کلسیم، با سیلیکات موجود در ذرات معلق خاکستر واکنش می‌دهد تا یک فاز شیشه‌ای گداخته‌شده تشکیل شود. واکنش شیشه‌ای منجر به تشکیل رسوب سنگین تفاله‌های فلزی<sup>۲</sup> می‌شود. تشکیل رسوب سخت، ناشی از ذرات به‌هم‌چسبیده ذرات معلق خاکستر، می‌تواند توسط مخلوط‌های نمکی فلزات سنگین و قلیایی شتاب یابد [۳ و ۴].

۳. حاصل از فاز مذاب: رسوباتی که حاوی سیلیکات قلیایی با دمای ذوب پایین‌تر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گرادند، در اثر تشکیل مذاب، سطح چسبنده‌ای را برای افزایش رسوب فراهم می‌کنند. در واقع درصد بالای سیلیسیم و فلزات قلیایی در زیست‌توده، به‌آسانی می‌توانند منجر به افزایش رسوب زیست‌توده شود [۳ و ۴].

کمترین درصد عناصر در خاکستر مربوط به آلومینیوم، آهن، منگنز است که فلزات سنگین هستند. پس از احتراق سوخت‌های زیست‌توده، اکثر فلزات سنگین در خاکستر باقی می‌مانند و مقدار اندکی از آن‌ها به‌صورت بخار یا به‌صورت ذرات معلق در گازهای احتراقی خواهند بود. غلظت فلزات سنگین در خاکستر سوخت‌های زیست‌توده در کاربرد خاکستر اهمیت بسیاری دارند [۴ و ۱۹]، همچنین عنصر آلومینیوم موجب مشکل انباشتگی در محفظه‌های احتراقی می‌شود. مقدار عنصر آلومینیوم در نمونه‌های کاه گندم و جو خارج از محدوده مجاز ۰/۰۱۳-۰/۰۰۶ است و در نمونه کاه جو تقریباً ۷/۵ برابر کاه گندم است. منگنز از جمله فلزات سنگین است که در بهره‌وری از خاکستر حاصل از احتراق تأثیر دارد و مقدار آن در نمونه جو، تقریباً ۱۹ برابر کاه گندم است.

1. Fly ash
2. Slag

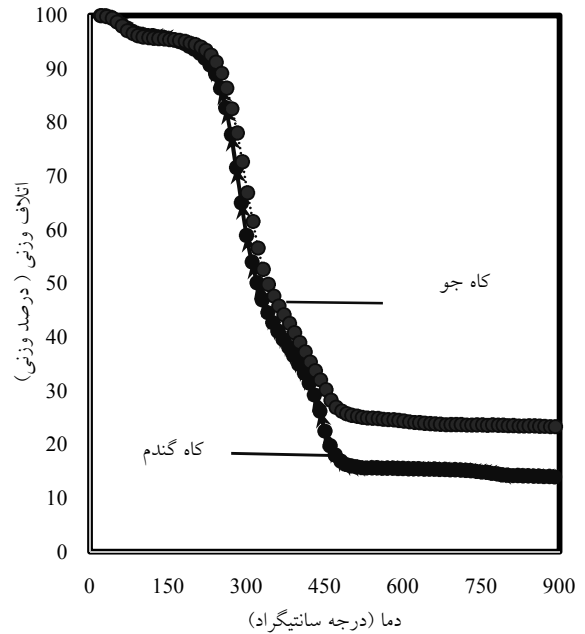
جدول (۳): نتایج آنالیز کلی نمونه‌های کاه جو و گندم (برحسب درصد وزنی)

نوع زیست‌توده	کربن تثبیت شده	خاکستر	مواد فرار	رطوبت
کاه جو	۱۹/۳۸۳	۲۳/۳۴۳	۵۳/۰۶	۴/۴۱۲
کاه گندم	۲۴/۰۸	۱۳/۹۸۵	۵۸/۰۹۱۹	۳/۸۰۴۱

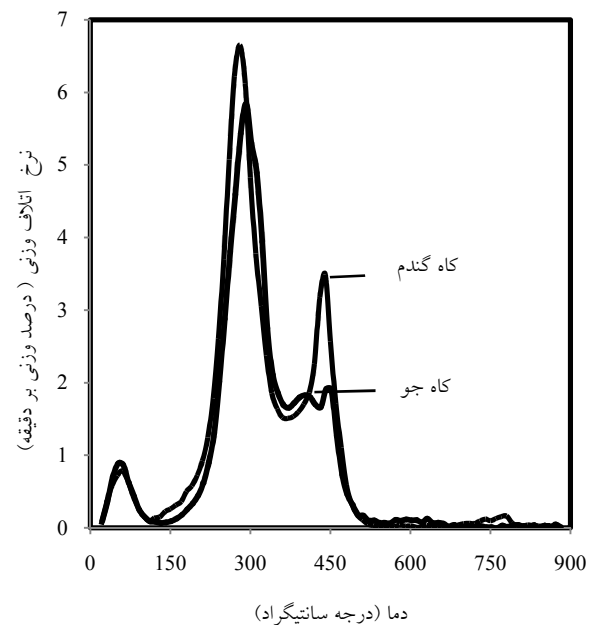
همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، احتراق هر دو نمونه کاه گندم و جو شامل سه پیک است که نشان‌دهنده سه مرحله احتراقی است. مرحله اول (پیک اول) مربوط به کاهش وزن بر اثر تبخیر رطوبت است. نمونه‌های زیست‌توده مورد مطالعه در یک محیط کاملاً خشک و به دور از رطوبت، در محیط آزمایشگاه نگهداری شده‌اند. به همین دلیل، پیک‌های مربوط به ناحیه اول هر سه نمونه ملایم و کوچک است و کاهش وزن در این مرحله، به دلیل رطوبت کم نمونه‌ها اندک است. در واقع، نمونه‌های بررسی شده کمتر از ۵ درصد وزن خود را در این مرحله از دست می‌دهند و بازه دمایی از دست دادن رطوبت نمونه‌های کاه گندم و جو به ترتیب، تقریباً ۲۰ تا ۱۲۰ و ۲۲ تا ۱۴۲ درجه سانتی‌گراد است.

از لحاظ ساختاری، احتراق سوخت‌های زیست‌توده در دو مرحله صورت می‌گیرد: بدین گونه که پیک دوم نمودار مشتق توزین حرارتی مربوط به تجزیه سلولز و هموسلولز و جزئی از لیگنین<sup>۱</sup> موجود در ساختار زیست‌توده است که مربوط به مرحله تبخیر مواد فرار است. اتلاف وزنی در این مرحله بر طبق جدول (۳)، برای نمونه کاه گندم تقریباً ۵۸٪ و کاه جو ۵۳٪ وزن است. پیک سوم مربوط به تجزیه لیگنین باقی‌مانده و احتراق مواد فرار باقی‌مانده است که هرچه لیگنین موجود در ساختار سوخت زیست‌توده مورد نظر بیشتر باشد، پیک سوم بزرگ‌تر و محتوی کربن تثبیت‌شده بیشتری خواهد بود. وجود دو پیک در مرحله سوم نیز نشان‌دهنده دو ساختار متفاوت در سوخت زیست‌توده است. از طرفی واکنش‌پذیری یک سوخت زیست‌توده به دلیل بالا بودن مواد فرار و انرژی آزاد شده از آن، به دلیل احتراق کربن تثبیت‌شده آن است. همان‌طور که گفته شد، پیک سوم مربوط به مرحله سوم احتراق است که کربن تثبیت‌شده<sup>۲</sup> می‌سوزد.

همچنان‌که در نمودار مشتق توزین حرارتی (شکل ۲) ملاحظه می‌شود، نمونه کاه جو شامل دو پیک واضح است که مربوط به تفاوت بین بافت‌های سلولزی و هموسلولزی و در نهایت، تبخیر مواد چوبی است. در واقع، نمونه کاه جو بافت یکنواختی ندارد که منجر به این دو پیک شده است، در صورتی که نمونه کاه گندم شامل یک پیک است. پس از مرحله دوم و آزاد شدن مواد فرار، منطقه احتراق واقعی شروع می‌شود [۱۱ و ۱۸]. محدوده درجه حرارتی و میانگین شدت از دست دادن جرم کاهش



شکل (۱): آنالیز توزین حرارتی زیست‌توده‌های کاه جو و گندم تحت شرایط محیط اکسیدی



شکل (۲): مشتق منحنی توزین حرارتی زیست‌توده‌های کاه جو و گندم تحت شرایط محیط اکسیدی

نتیجه به‌دست‌آمده از آنالیز توزین حرارتی نمونه‌های کاه جو و گندم با استفاده از شکل (۱) در جدول (۳) آورده شده است.

1. Lignin  
2. FC



وزن تحت اکسیداسیون هوا برای هر دو تجزیه اکسایشی و منطقه احتراقی زغال با توجه به نمودار شکل (۲) در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): مشخصه‌های حرارتی زیست‌توده‌های کاه جو و گندم

نوع زیست‌توده	کاه جو	کاه گندم
منطقه اکسید شدن		
حداکثر نرخ از دست دادن جرم ( $\text{min}^{-1}\%$ )	۵/۸۴	۶/۶۵
محدوده دمایی ( $^{\circ}\text{C}$ )	۲۴۰-۳۵۲/۲۲۸	۲۳۰-۳۵۰/۴۶۲
میانگین نرخ از دست دادن جرم ( $\text{min}^{-1}\%$ )	۳/۷۴	۳/۸
منطقه احتراقی زغال		
محدوده دمایی ( $^{\circ}\text{C}$ )	۴۴۲-۴۷۲	۴۲۰-۴۶۲
میانگین نرخ از دست دادن جرم ( $\text{min}^{-1}\%$ )	۱/۶۹	۲/۶۷

بر طبق جدول (۴)، حداکثر شدت اتلاف حرارتی به ترتیب برای نمونه‌های کاه گندم و کاه جو است، در منطقه اکسید شدن و زغالی شدن نیز میانگین نرخ از دست دادن جرم به همین ترتیب است که بیانگر بالا بودن واکنش‌پذیری نمونه کاه گندم نسبت به نمونه کاه‌جو در هر دو مرحله احتراقی است. در منطقه زغالی شدن سوخت‌های جامدی که محتوی لیگنین و کربن تثبیت‌شده بیشتری هستند، در این مرحله، واکنش‌پذیری بیشتری خواهند داشت. زمان لازم برای مرحله اکسایش نمونه‌های کاه گندم و جو با توجه به نتایج آنالیزتوزین حرارتی به ترتیب، ۵۱٪ و ۲۶٪ و برای زغالی شدن، ۱۸٪ و ۱۳٪ زمان کل احتراق زیست‌توده‌هاست، نشان‌دهنده طولانی‌تر بودن مرحله اکسایش نسبت به زغالی شدن است. با توجه به جدول (۴) نیز می‌توان گفت که شدت احتراق در مرحله دوم، بیشتر از مرحله سوم احتراقی است که تأییدکننده نتیجه می‌ونر<sup>۱</sup> است [۱۱].

در نهایت، احتراق نمونه کاه گندم تقریباً به ۱۴٪ و کاه جو به ۲۳٪ خود می‌رسد که نمونه کاه جو محتوی خاکستر بیشتری است. بالا بودن درصد خاکستر باعث کاهش ارزش حرارتی سوخت و افزایش انرژی فعال‌سازی در مرحله زغالی شدن می‌شود و بر انتشار مواد غیرآلی و مواد فرار، واکنش‌پذیری مواد آلی سوخت تأثیر می‌گذارد [۳] و می‌تواند مشکل‌هایی از جمله انباشتگی را در سیستم‌های احتراقی و ذخیره‌سازی و دفع را در پی داشته باشد.

#### ۴.۳. اندازه‌گیری پارامترهای احتراقی

با استفاده از نمودارهای شکل (۱) و (۲)،  $T_i$  (نقطه شروع احتراق) و نقطه  $T_F$  (نقطه پایان احتراق) تعیین می‌شود. دمای اشتعال (دمای شروع به احتراق) سوخت است که نه تنها پایین‌ترین دمای سوختن

سوخت است، بلکه شاخص اصلی عملکرد احتراق است، پایین‌ترین دمای اشتعال نشان‌دهنده بهترین عملکرد شروع به احتراق سوخت است. در این مطالعه، دمای اشتعال از روش  $TG-DTG^*$  و دمای پایان احتراق با استفاده از نقطه ۹۸٪ اتلاف وزنی محاسبه می‌شود. شاخص اشتعال‌پذیری  $D_i$  منعکس‌کننده ویژگی‌های احتراقی سوخت است که بالا بودن مقدار آن نشان‌دهنده این است که سوختن سوخت پایدار است؛ یعنی سوخت مورد نظر نسبت به سایر سوخت‌ها فرایند سوختن پایدارتری دارد. شاخص احتراق یا قابلیت احتراق  $S^o$  نشان‌دهنده عملکرد شروع اشتعال و اتمام سوخت است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، عملکرد کلی احتراق بهتر خواهد بود و با استفاده از معادلات (۱) و (۲) قابل محاسبه‌اند [۲، ۲۲ و ۲۳].

$$D_i = \frac{(dw/dt)_{\max}}{t_p t_i} \quad (1)$$

$$S = \frac{(dw/dt)_{\max} \cdot (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 \cdot T_F} \quad (2)$$

که  $R_{\max} = (dw/dt)_{\max}$  حداکثر شدت احتراقی است (با استفاده از نمودار ۲) و  $T_F$  دمای پایان احتراق،  $t_p$  زمان حداکثر نرخ احتراق و  $t_i$  زمان شروع احتراق است  $R_a = (dw/dt)_{\text{mean}}$  میانگین شدت از دست دادن جرم بین دمای اشتعال و پایان احتراق است [۲۴ و ۲۵] مقادیر پارامترهای احتراقی در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): پارامترهای احتراقی زیست‌توده کاه گندم و جو

نوع زیست‌توده	کاه جو	کاه گندم
$T_i (^{\circ}\text{C})$	۲۴۰	۲۳۰
$t_i (\text{min})$	۲۱/۲	۲۲/۱۷
$T_F (^{\circ}\text{C})$	۴۷۲	۴۶۲
	۴۵/۴	۴۴/۴۳
$T_p (^{\circ}\text{C})$	۳۰۲/۲	۲۹۰/۵
$t_p (\text{min})$	۲۸/۳۳	۲۷/۱۵
$\max (dw/dt) (\text{mg} \cdot \text{min}^{-1})$	۲۸/۹۲	۳۶/۳
	۴۸/۱۵	۶۰/۳۱
	۱۳/۲۴	۱۶/۳
$S \times 10^{-4}$	۱۸۷/۶۵	۲۷۰/۹

با توجه به جدول (۵)، دمای اشتعال نمونه کاه جو و گندم به ترتیب، در دمای ۲۴۰ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد، شروع به احتراق و در دمای پایان احتراق ۴۷۲ و ۴۶۲ درجه سانتی‌گراد، به ثبات حرارتی

$$\frac{dX}{dt} = A \exp(-E/RT) (1 - X)^n \quad (۴)$$

بعد از گنجاندن شدت حرارتی غیر هم‌دمای  $\beta = \frac{dT}{dt}$  TG در معادله (۴)

$$\frac{dX}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) (1 - X)^n \quad (۵)$$

بر طبق معادله (۵)، نمودار  $\ln((dX/dT) / (1 - X)^n)$  بر  $1/T$  به صورت یک خط مستقیم با شیب  $-E/R$  است برای هر مقداری از  $n$  که ضریب رگرسیون نزدیک به مقدار واحد شود [۱۱].

به‌طور کلی، گزارش انرژی فعال‌سازی واکنش احتراق سوخت جامد از هر روش سینتیکی ممکن است نتیجه مختلفی بدهد. سوخت‌های جامدی که همگن نیستند، نتیجه به‌دست‌آمده از آن‌ها وابسته به شرایط آزمایش و ویژگی‌های مواد و روش‌های سینتیکی استفاده‌شده در محاسبات است. بنابراین، نتیجه‌ها بر این اساس می‌تواند متفاوت باشد. لذا به‌جای تمرکز روی مقدار انرژی فعال‌سازی، باید به‌دنبال مقایسه انرژی فعال‌سازی با استفاده از یک روش سینتیکی باشیم [۱۲]. برای به‌دست‌آوردن سینتیک نمونه‌های زیست‌توده در این مطالعه از روش آرنیوس استفاده شده است، نتیجه‌های به‌دست‌آمده از داده‌های نمودار توزین حرارتی برای نمونه‌های کاه‌جو و گندم با استفاده از روش حدس و خطا که در آن، محدوده درجه واکنش بر اساس مطالعات انجام‌شده برای سوخت‌های زیست‌توده در محدوده  $2 < n < 5$  است [۱۱]، حدس زده می‌شود تا زمانی که مقدار ضریب رگرسیون<sup>۱</sup> به مقدار مطلوب برسد. مقادیر انرژی فعال‌سازی و درجه واکنش و انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس نمونه‌های کاه‌جو و گندم با استفاده از روش آرنیوس مطابق شکل (۳) و (۴) با استفاده از شیب و عرض از مبدأ خطوط رسم‌شده به‌دست می‌آید. برخی از نقاط به‌علت ایجاد خطا در رسم رگرسیون جهت نزدیک شدن به معادله خط راست حذف شده است.

می‌رسند. دمای پیک مربوط به نمونه کاه گندم و جو به ترتیب، ۲۹۰/۵ درجه سانتی‌گراد است که در ۲۷/۱۵ دقیقه و ۳۰۲/۲ درجه سانتی‌گراد که در زمان ۲۸/۳۳ دقیقه رخ می‌دهد. نمونه کاه گندم با توجه به جدول (۵) نسبت به کاه جو شاخص احتراق و اشتعال‌پذیری بیشتر و در نتیجه، دمای پیک و زمان حداکثر نرخ احتراق و دمای پایان احتراق کمتر، اما حداکثر نرخ احتراقی بیشتری دارد. همچنین احتراق گونه‌هایی که نسبت مقدار عنصر هیدروژن به کربن (H/C (Barley)=0.11) H/C (Wheat)=0.134) و مواد فرار بیشتر و درصد رطوبت کمتری دارند، سریع‌تر است و واکنش‌پذیری بالاتری خواهند داشت و شاخص‌های احتراقی آن‌ها بزرگ‌تر خواهد بود [۱۱]. تمام پارامترهای بررسی‌شده نشان‌دهنده واکنش‌پذیری بیشتر کاه گندم نسبت به کاه جو است. بر طبق شکل (۲) نرخ از دست دادن جرم برای نمونه کاه گندم بیشتر از کاه جو است.

### ۵.۳. بررسی رفتار سینتیکی نمونه‌های زیست‌توده

روش‌های متعددی برای آنالیز سینتیکی داده‌های تجربی حرارتی غیر هم‌دمای در عمل وجود دارند، به‌ویژه در تعیین انرژی فعال‌سازی ظاهری فرایندهای پیچیده‌ای همانند تخریب حرارتی زیست‌توده، احتراق زیست‌توده که به‌علت تفاوت در ترکیب شیمیایی اجزای سازنده زیست‌توده و حضور ترکیب‌های متعدد، واکنش‌های متوالی و موازی است، هیچ مدل سینتیکی نمی‌تواند به‌طور جامع مکانیسم تجزیه حرارتی در انواع زیست‌توده را توضیح دهد [۱۲].

برای به‌دست‌آوردن انرژی فعال‌سازی واکنش‌های احتراق از روش‌های سینتیکی همانند ASTM 1, I, Kissinger و Zawa-Flynn-Wall و آرنیوس می‌توان استفاده کرد [۱۲]. بر طبق معادله آرنیوس که توسط بسیاری از محقق‌ها برای تجزیه و تحلیل استفاده شده، در طول آنالیز توزین حرارتی  $w_0$  مقدار جرم زیست‌توده در زمان  $t=0$  است. تغییرات نرخ می‌تواند به‌صورت تابعی از نرخ تبدیل وزنی  $X$  در زمان  $t$  نوشته شود، نرخ تبدیل به‌صورت  $X = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_\infty}$  که  $w_\infty$  جرم باقی‌مانده در نهایت فرایند است [۱۱ و ۲۰].

$$\frac{dX}{dt} = K \cdot f(X) \quad (۳)$$

که در اینجا  $K$  ثابت نرخ و  $f(X) = (1 - X)^n$  درجه واکنش است. بر طبق رابطه آنتوان، ثابت نرخ  $K = A \exp(-E/RT)$  که  $A$  فاکتور فرکانس،  $E$  انرژی فعال‌سازی،  $R$  ثابت عمومی گازها و  $T$  دمای واکنش است. بنابراین بر طبق رابطه (۳) می‌توان نوشت:



سوم: زغالی شدن) محاسبه و در جداول (۶) و (۷) آورده شده است.

جدول (۶): انرژی فعال‌سازی و درجه واکنش زیست‌توده‌های کاه جو و گندم در مرحله اکسید شدن (مرحله دوم احتراقی)

مرحله اکسید شدن				زیست توده
ضریب رگرسیون (R <sup>2</sup> )	فاکتور فرکانس (A (S <sup>-1</sup> ))	درجه واکنش	انرژی فعال‌سازی (Kj.mol <sup>-1</sup> )	
۰/۹۹۰۲	۴۲۷۷۲۷	۲	۸۹	کاه جو
۰/۹۹۵	۱۷۲۵۸۶۷	۲	۹۳/۸۵۷	کاه گندم

جدول (۷): انرژی فعال‌سازی و درجه واکنش زیست‌توده‌های کاه جو و گندم در مرحله زغالی شدن (مرحله سوم احتراقی)

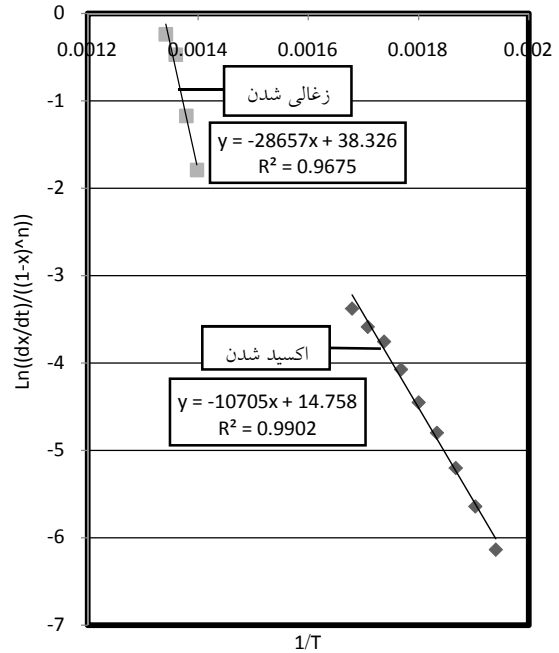
مرحله زغالی شدن				زیست توده
ضریب رگرسیون (R <sup>2</sup> )	فاکتور فرکانس (A (S <sup>-1</sup> ))	درجه واکنش	انرژی فعال‌سازی (Kj.mol <sup>-1</sup> )	
۰/۹۶۷۵	۷/۳ E + ۱۵	۲	۲۳۸/۲۵۴	کاه جو
۰/۹۵۰۵	۵۶۲۹۲۴۱۴۱۸	۱	۱۶۵/۵۴۰	کاه گندم

بر طبق جدول (۶)، انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها به هم نزدیک است و فاکتور فرکانس کاه گندم بزرگ‌تر از کاه جو است. واکنش‌هایی که انرژی فعال‌سازی بالاتری دارند، واکنش‌پذیری کمتری دارند. از طرفی، فاکتور فرکانس نیز که نشان‌دهنده فعالیت مولکول‌های داخلی مواد در درجه حرارت معین است، مربوط به ساختار زیست‌توده است. بر طبق جدول (۷)، انرژی فعال‌سازی نمونه کاه جو بیشتر از کاه گندم است و فاکتور فرکانس نیز به همین ترتیب است. با مطالعه دو جدول (۶) و (۷)، انرژی فعال‌سازی مرحله زغالی شدن بیشتر از اکسید شدن است که به علت احاطه شدن کربن تثبیت‌شده توسط خاکستر پس از انتشار مواد فرار است و فاکتور فرکانس مرحله سوم بیشتر از دوم است. مرحله سوم کندترین مرحله است که تعیین‌کننده سرعت واکنش است [۲۳ و ۲۶].

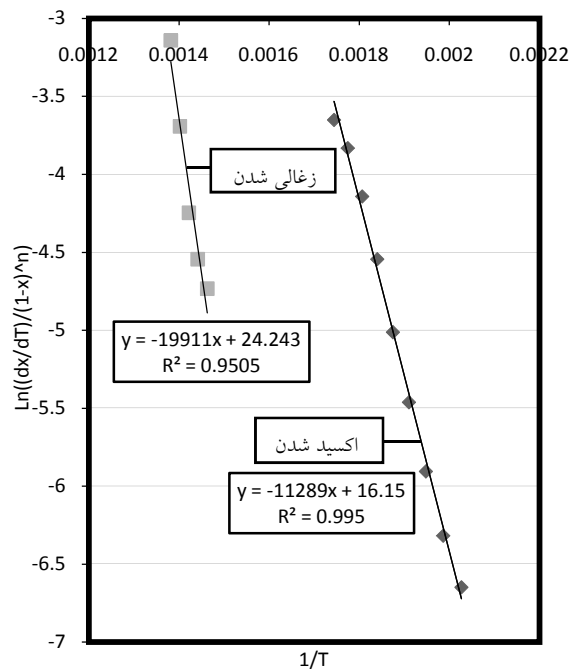
یان و همکاران، میونر و همکاران برای محاسبه پارامترهای سینتیکی به روش آرنیوس به ضریب رگرسیون ۰/۸۱ تا ۰/۹۹ برای نمونه‌های زیست‌توده مورد مطالعه خود رسیدند که در واقع، رسیدن به این ضریب رگرسیون درباره سوخت‌های زیست‌توده قابل قبول است [۱۱ و ۲۳].

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتیجه‌های به‌دست‌آمده از آنالیز عنصری هر دو نمونه کاه گندم و جو موجب انتشار اکسیدهای نیتروژن، گوگرد و هیدروکلریک اسید و دی‌اکسین‌ها می‌شوند و انتشارات اکسیدهای نیتروژن و گوگرد کاه جو بیشتر از کاه گندم و هیدروکلریک اسید و دی‌اکسین‌ها کاه جو کمتر از کاه گندم پیش‌بینی می‌شود. آنالیز خاکستر نشان می‌دهد کاه جو محتوی کلر، پتاسیم و گوگرد (عنصرهای اصلی تشکیل‌دهنده



شکل (۳): نمودار به‌دست‌آوردن انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس زیست‌توده کاه جو با روش آرنیوس



شکل (۴): نمودار به‌دست‌آوردن انرژی فعال‌سازی و فاکتور فرکانس زیست‌توده کاه گندم با روش آرنیوس

در این مقاله، انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها با استفاده از روش آرنیوس که متداول‌ترین و ساده‌ترین روش در به‌دست‌آوردن پارامترهای سینتیکی است، محاسبه شده است. زیرا هدف فقط مقایسه انرژی فعال‌سازی دو مرحله احتراقی اکسید و زغالی شدن است. برای دو مرحله احتراقی (مرحله دوم: مرحله اکسید شدن و مرحله

مرحله احتراقی، کاه جو به دمای بالاتری نیاز دارد. در نتیجه هر دو نمونه کاه گندم و جو بررسی شده نمی‌توانند به‌طور مستقیم استفاده شوند و نیاز به پردازش مناسب (مثلاً تبدیل کاه به شکل گلوله یا قرص‌های متراکم‌شده) و اصلاح فرایند رشد و خرم‌ن گیاه (استفاده از کود و خاک مناسب، شست‌وشوی گیاه پس از خرم‌ن ...) است تا مواد معدنی نیتروژن، گوگرد و کلر موجود در گیاه کاهش یابد. همچنین با افزودن موادی به‌عنوان کاتالیست یا کاهش‌دهنده مشکلات فنی در بستر احتراق، می‌توان مشکل‌های مربوط به این سوخت‌ها را تا حد زیادی کاهش داد.

رسوب و خوردگی) کمتری نسبت به کاه گندم است. نتیجه‌های آنالیز توزین حرارتی نشان می‌دهد که کاه جو محتوی خاکستر و رطوبت بیشتری است که موجب افزایش مشکل‌های فنی و دمای اشتعال می‌شود، مواد فرار و کربن تثبیت شده و حداکثر نرخ از دست دادن جرم و نسبت هیدروژن به کربن کمتر، دما و زمان پیک، دمای پایان احتراق بیشتری دارد که بیانگر کم بودن واکنش‌پذیری کاه جو نسبت به کاه گندم است. با بررسی سیتیک نمونه‌ها، انرژی فعال‌سازی کاه جو در مرحله زغالی شدن بیشتر از کاه گندم است که شاید به‌علت زیاد بودن درصد خاکستر تولید شده از کاه جو نسبت به کاه گندم است که در این

## مراجع

- [1] Munir , S.S.D., W. Nimmo, A.M. Cunliffe, B.M. Gibbs, Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology* , Vol. 100, pp. 1413-1418, 2009.
- [2] Saidura, E.A.A., A. Demirbasb, M.S. Hossaina, S. Mekhilefc, A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No.13, pp. 2262-2289, 2011.
- [3] Khana , W.d.J., P.J. Jansens, H. Spliethoff Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, pp. 21-50, 2009.
- [4] Sjaak van Loo , J.K., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. 1 ed. 2008, london: FiSH Books, Enfield.
- [5] Fernández, R.G., et al., Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. *Fuel Processing Technology*, Vol. 103, pp. 16-26, 2012.
- [6] Zhi-Ao Sun , B.-S.J., Ming-Yao Zhang, Ren-Ping Liu, Yong Zhang, Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 1027-1040, 2008.
- [7] Liang Wanga Johan E. Hustada, Ø.S.G.S., Morten Grønli A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia*, Vol. 20, pp. 20-29, 2012.
- [8] Simoneit, B.R.T., Biomass burning - a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Applied Geochemistry*, Vol.17, pp. 129-162, 2002.
- [9] Kok, M.V. and E. Özgür, Thermal analysis and kinetics of biomass samples. *Fuel Processing Technology*, Vol.106: pp. 739-743, 2013.
- [10] Wang, L., et al., Investigation on catalyzed combustion of wheat straw by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, Vol.512, pp. 254-257, 2011.
- [11] Munir, S., et al., Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. *Bioresour Technol*, Vol. 100, No. 3, pp. 1413-8, 2009.
- [12] Mustafa Versan Kok, E.Ö., Thermal analysis and kinetics of biomass samples. *Fuel Processing Technology*, Vol.106, pp. 739-743, 2013.
- [13] Demirbas, A., Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, pp. 219-230, 2004.
- [14] Demirbas, A., Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, pp. 171-192, 2005.
- [15] Huang, C. L.H. and X.L. Z. Yang, Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management*, Vol. 29, pp. 1793-1797, 2009.
- [16] Sun, Z.-A., et al., Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 1027-1040, 2008.
- [17] Aigbodion, V. S. , S.B.H., T. Ause ,G.B. Nyior, Potential Utilization of Solid Waste (Bagasse Ash). *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol.9, pp. 67-77, 2010.
- [18] Ingwald Obernberger, T.B., Georg Barnthaler, Chemical properties of solid biofuels-significance and impact *BIOMASS & BIOENERGY*, Vol.30, pp. 973-982, 2006.
- [19] Annett Pollex, D.B.D., Thomas Zeng, Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), *MIXBIOPELLS*. 2012. 126.
- [20] Paolo Ghatti, L.R., Luciana Angelini, Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, Vol.75, pp. 565-573, 1996.
- [21] Helena L. Chum, R.P.O., Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, Vol. 71, pp. 187-195, 2001.
- [22] L. J. Yu, S.W., X. M. Jiang, N. Wang and C. Q. Zhang, Thermal Analysis Studies on Combustion Characteristics of Seaweed. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 93, pp. 611-617, 2008.
- [23] Yan Y.F, Z.Z.E., Zhang L, Zhang L, Influence of Coal Properties on the Co-Combustion Characteristics of Low-Grade Coal and City Mud. *Global NEST Journal*, Vol.16, pp. 329-338, 2014.
- [24] Li Xiang-guo , M.B.-g., Xu Li, Hu Zhen-wu, Wang Xing-gang, Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. *Thermochimica Acta*, Vol. 441, pp.79-83, 2006.
- [25] Vamvuka, D, E.K., Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends, *Fuel Processing Technology*, Vol.92, pp.570-581, 2011.
- [26] M.V. Gil, D.C., C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera, Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*, Vol.101, pp. 5601-5608, 2010.