

## مطالعه تحلیلی سینتیک فرایندهای مختلف در پیرولیز ابر ذرات لایکوپدیوم

حسین بیدقی دیزجی<sup>۱</sup> و مهدی بیدآبادی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق (نویسنده مخاطب)،

Beidaghy\_Hossein@mecheng.iust.ac.ir

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق، Bidabadi@iust.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۱/۹/۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۲/۲/۵، پذیرش: ۹۲/۳/۱۰)

در مقاله حاضر، با توجه به اهمیت پارامترهای مختلف سینتیک فرایندهای خشک شدن و پیرولیز ذرات ارگانیکی چون لایکوپدیوم بر روی مدل‌های تحلیلی احتراق این نوع ذرات، به بررسی سینتیک این فرایندها پرداخته شده است. در این تحقیق، با استفاده از منحنی‌های TGA نتایج آزمایشگاهی موجود به بررسی منحنی‌های DTG و ارائه یک مدل تحلیلی برای سینتیک فرایندهای خشک شدن و پیرولیز ذرات در پدیده احتراق پرداخته شده است. در این کار، به صورت تحلیلی سینتیک پیرولیز و خشک شدن رطوبت ذرات لایکوپدیوم مطالعه شده و با استفاده از آن ضرایب سینتیکی مربوط به هر مرحله از پیرولیز این ذره به دست آمده است. نتایج نشانگر تطابق فوق‌العاده مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی موجود است. می‌توان نتایج حاصل از این کار را با درصد اطمینان بالایی در مدل‌های تحلیلی آینده برای ذرات لایکوپدیوم مورد استفاده قرار داد.

**کلیدواژگان:** احتراق ذرات لایکوپدیوم، سینتیک فرایند پیرولیز، سینتیک فرایند خشک شدن

### مقدمه

با توجه به افزایش مصرف انرژی و حرکت کشور به سمت واقعی کردن قیمت حامل‌های انرژی و البته پتانسیل بالای کشور از نظر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، همچون انرژی حاصل از احتراق ذرات ارگانیک، در قدم اول بررسی خواص احتراقی این منابع دارای اهمیت غیر قابل انکار است. یکی از منابع مهم انرژی، که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه کشورهای پیشرفته دنیا قرار گرفته است، انرژی حاصل از احتراق ذرات ارگانیکی چون لایکوپدیوم است که بسیار ارزان، پاک، در دسترس و همیشگی است. بنابراین، شناسایی خصوصیات مختلف احتراقی این گونه مواد به عنوان اولین گام در استفاده از این منابع عظیم انرژی بسیار حائز اهمیت است. احتراق ذرات ارگانیک هم‌زمان شامل انتقال حرارت، انتقال جرم، تغییر فاز، تبخیر رطوبت، پیرولیز ذرات بر اثر حرارت و واکنش شیمیایی یا احتراق گازهای حاصل از پیرولیز است. با در نظر گرفتن این فرایندها مشخص می‌شود که فرایند احتراق ذرات ارگانیک یک مسئله بسیار پیچیده است که هنوز کاملاً شناخته شده نبوده و نیازمند تحقیقات و بررسی‌های فراوان است.

یکی از خواص ذره لایکوپدیوم خاصیت تک‌سایزی بودن آن است. از این رو از آن به عنوان ذره مرجع در احتراق ذرات ارگانیک استفاده می‌شود. خاصیت بعدی این ماده تخلخل بالای داخل آن است که باعث می‌شود میزان گاز تولیدی در مرحله پیرولیز حداکثر بوده و خاصیت اشتعال‌پذیری بالایی را برای ذره فراهم کند که نتایج انجام شده در آزمایشگاه SEM دانشگاه علم و صنعت ایران نیز گویای همین امر است [۱، ۲].

منحنی های TGA<sup>۱</sup> و DTG<sup>۲</sup> برای هر ماده‌ای اساساً به اجزای تشکیل‌دهنده و خواص پیرولیز ترکیبات موجود در آن ذره ارگانیک وابسته‌اند [۳]. ذرات ارگانیک زیست‌توده از جمله لایکوپدیوم از سه ترکیب سلولز<sup>۳</sup>، همی‌سلولز<sup>۴</sup> و لیگنین<sup>۵</sup> تشکیل شده است [۳]. تحت نرخ حرارتی معمولی، ابتدا همی‌سلولوز، بعد سلولوز، پیرولیز می‌شوند و ترکیب لیگنین به صورت آرام و تدریجی، در تمام محدوده دمایی پیرولیز و بدون ظهور قله‌ای در منحنی کاهش جرم، پیرولیز می‌شود. یعنی لیگنین به نسبت دو جزء دیگر (همی‌سلولز و سلولز) به صورت پایدار دمایی رفتار می‌کند [۳].

در این تحقیق، با استفاده از نتایج منحنی‌های TGA هان و همکارانش [۴] و منحنی TGA و DTG زیوکوا و همکارانش [۵]، که برای ذرات ارگانیک لایکوپدیوم ارائه شده‌اند، مدلی تحلیلی برای فرایندهای خشک‌شدن (تبخیر رطوبت) و پیرولیز ذرات لایکوپدیوم ارائه شده است. ضمن آنکه سینتیک فرایندهای فوق مطالعه شده است و مقادیر انرژی فعالساز و ضریب پیش‌نمایی<sup>۶</sup> معادله آرنیوس برای هر فرایند جداگانه محاسبه شده است. این ضرایب در تحلیل احتراق ذرات لایکوپدیوم یا به‌طور کلی ذرات ارگانیک دارای نقش اساسی است که تاکنون در مدل‌های ارائه‌شده [۶-۱۱] جهت سادگی از سینتیکی استفاده می‌شد که این سینتیک و مقادیر ارائه‌شده برای ذرات ارگانیک خاصی چون لایکوپدیوم نبود، ضمن آنکه پشتوانه تجربی نیز نداشت. در حالی که سینتیک معرفی‌شده در این تحقیق، با توجه به نتایج ارائه‌شده، با نتایج آزمایشگاهی سازگاری بسیار خوبی را نشان می‌دهد. می‌توان نتایج فوق را با قابلیت اطمینان بالایی در مدل‌های تحلیلی آینده برای ذرات لایکوپدیوم استفاده کرد.

### مدل تحلیلی سینتیک پیرولیز لایکوپدیوم

برای فرایندهای مختلف خشک‌شدن و پیرولیز ترکیبات مختلف موجود در انواع ذرات ارگانیک مانند لایکوپدیوم، که در محدوده دماهای مختلف انجام می‌پذیرند، مدل سینتیک زیر ارائه شده است [۱۲-۱۴]:

$$\frac{dy_i^*}{dt} = K_i \times f(y_i^*) \quad (1)$$

در معادله بالا،  $i$  نشان‌دهنده شماره فرایندهای مختلفی است که برحسب دما به صورت پشت سر هم اتفاق می‌افتند و برای  $K_i$  از معادله آرنیوس استفاده شده است و داریم:

$$K_i = A_i \times \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (2)$$

$$f(y_i^*) = (1 - y_i^*)^n \quad (3)$$

در معادلات بالا،  $n$  مرتبه واکنش در هر فرایند و  $y_i^*$  کسر کاهش جرم هر فرایند است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y_i^* = \frac{M_{S_0} - M_S}{M_{S_0} - M_{S_\infty}} \quad (4)$$

حال، با تعریف نرخ حرارت‌دهی  $H$  معادله (۱) به شکل جدید زیر در می‌آید:

$$\begin{cases} H = \frac{dT}{dt} \rightarrow dt = \frac{dT}{H} \\ \frac{dy_i^*}{f(y_i^*)} = K_i \times dt \end{cases} \Rightarrow \frac{dy_i^*}{f(y_i^*)} = \frac{K_i}{H} \times dT \quad (5)$$

1. Thermal gravimetric analysis
2. Derivative thermal gravimetric
3. Cellulose
4. Hemicellulose
5. Lignin
6. Pre-exponential factor

با انتگرال گیری از معادله (۵) معادله زیر حاصل می شود:

$$f^*(y_i^*) = \int_0^{y_i^*} \frac{dy_i^*}{f(y_i^*)} = \frac{A_i}{H} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) dT \quad (6)$$

برای حل معادله انتگرالی معادله (۶) طرفین معادله بالا در جمله  $\frac{1}{T^2}$  ضرب شده است:

$$f^*(y_i^*) = \int_0^{y_i^*} \frac{dy_i^*}{T^2 \times f(y_i^*)} = \frac{A_i}{H} \int_{T_0}^T \frac{1}{T^2} \times \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) dT \quad (7)$$

در نتیجه:

$$\frac{f^*(y_i^*)}{T^2} = \frac{A_i R}{H \times E_i} \left[ \exp\left(\frac{-E_i}{R \times T}\right) - \exp\left(\frac{-E_i}{R \times T_0}\right) \right] \quad (8)$$

$$f^*(y_i^*) = \int_0^{y_i^*} \frac{1}{(1-y_i^*)^n} = \begin{cases} -\text{Ln}(1-y_i^*) \Leftarrow n=1 \\ \frac{1-(1-y_i^*)^{-n}}{1-n} \Leftarrow n \neq 1 \end{cases} \quad (9)$$

در معادله (۸)، با توجه به اینکه  $\exp\left(\frac{-E_i}{R \times T_0}\right) \ll 1$  است، می توان معادله بالا را به شکل زیر ساده سازی کرد:

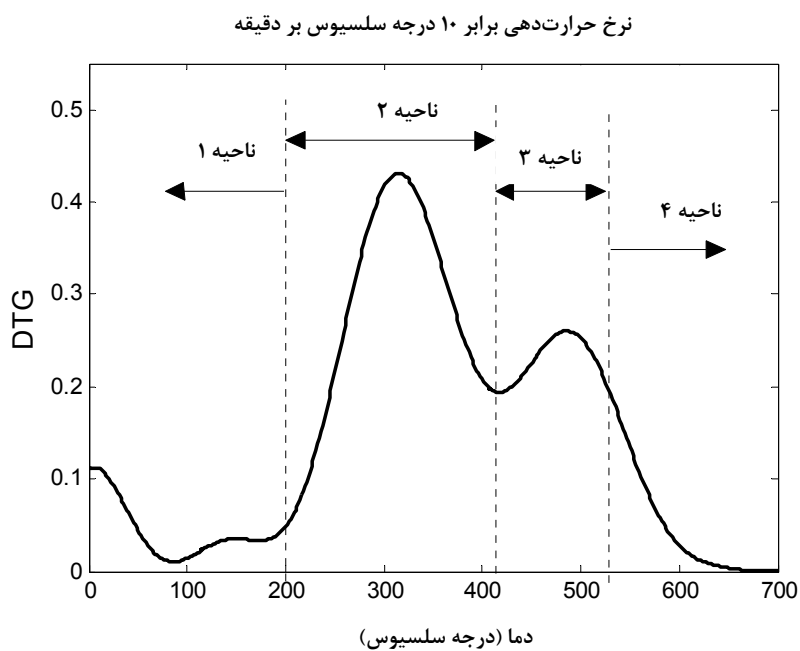
$$\text{Ln} \left[ \frac{f^*(y_i^*)}{T^2} \right] = \text{Ln} \left( \frac{A_i R}{H \times E_i} \right) - \frac{E_i}{R} \times \frac{1}{T} \quad (10)$$

با توجه به معادله (۱۰)، مجهولات سینتیکی این معادله عبارتند از مرتبه واکنش پیرولیز در هر ناحیه ( $n$ )، انرژی اکتیواسیون در هر ناحیه ( $E$ ) و ضریب پیش‌نمایی آرنیوس ( $A$ ). برای یافتن این سه متغیر از یک کد رایانه‌ای استفاده شده است. مطابق معادله (۳)، اگر مرتبه واکنش پیرولیز معلوم باشد، از روی نمودارهای ترموگرومتری (TGA) ارائه شده از کارهای هان و همکارانش [۴] یا زیوکوا و همکارانش [۵] می توان عبارت  $f^*(y_i^*)$  را برحسب دما مطابق با معادله (۹) به دست آورد. مطابق معادله (۱۰)، جمله سمت چپ این معادله برحسب  $\frac{1}{T}$  به صورت یک معادله خطی است که شیب این معادله  $-\frac{E_i}{R}$  بوده و عرض از مبدا آن عبارت  $\left\{ \text{Ln} \left[ \frac{A_i \times R}{H \times E_i} \right] \right\}$  است، که در عبارت شیب و عرض از مبدا تنها مجهولات انرژی فعالسازی و ضریب پیش‌نمایی آرنیوس‌اند. در این مرحله، از روش حداقل کردن مربعات به‌عنوان یک تقریب خطی استفاده شده و مجهولات فوق به دست آورده شده‌اند. در این کد رایانه‌ای مرتبه واکنش پیرولیز از مقدار ۰/۰۱ تا ۱۰ با گام ۰/۰۱ افزایش یافت و با کمینه کردن خطای حاصل از حداقل کردن مربعات در نهایت مقدار مطلوب مرتبه واکنش پیرولیز در هر ناحیه حاصل شد که نتایج به شکل جدول‌های شماره ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

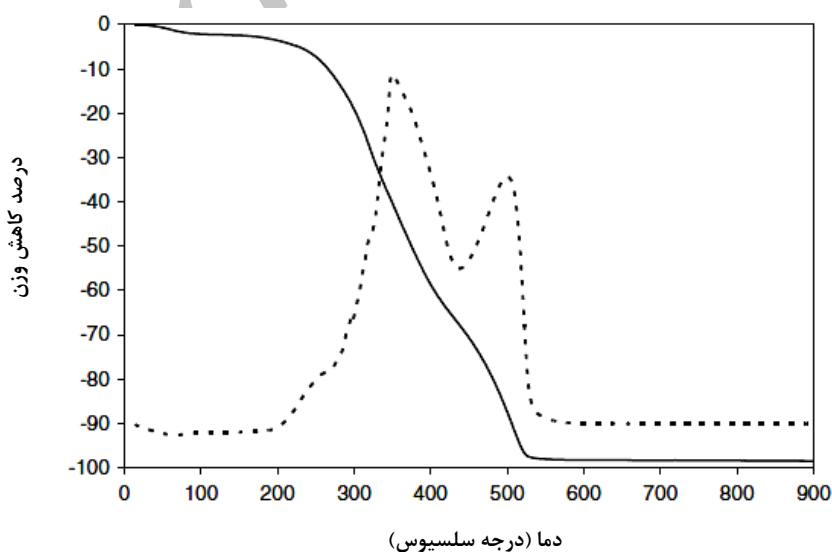
## نتایج و بحث

شکل ۱ نشان‌دهنده منحنی DTG حاصل از نتایج آزمایشگاهی هان و همکارانش [۴] برای نرخ حرارت‌دهی معمول ( $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ) است. با توجه به شکل ۱، مشاهده می‌شود که کل بخش حرارت‌دهی را می توان به چهار ناحیه تقسیم‌بندی کرد که به ترتیب عبارت‌اند از: ناحیه شماره ۱ که بیانگر فرایند خشک شدن ذرات (تبخیر رطوبت موجود داخل ذرات) است که در محدوده دمایی ۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد؛ ناحیه شماره ۲ که همان پیرولیز ترکیبات همی سلولز و لیگنین موجود در داخل ذرات است که در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۳۹۴ درجه سلسیوس رخ می‌دهد؛ ناحیه شماره ۳ که نشانگر پیرولیز ترکیبات سلولز و لیگنین است که در بازه دمایی ۳۹۴ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس به‌وقوع می‌پیوندد؛ ناحیه شماره ۴ که بیانگر ادامه پیرولیز ترکیب لیگنین موجود در داخل ذرات لایکوپدیوم است که در محدوده دمایی ۴۹۰ تا ۷۰۰ رخ می‌دهد.

شکل ۲ نشان‌دهنده منحنی DTG ارائه‌شده توسط کار زیوکوا و همکارانش [۵] است. با توجه به شکل فوق مرحله خشک‌شدن ذره لایکوپدیوم در بازه دمایی ۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد که این محدوده دمایی مشابه گزارش‌های کار هان و همکارانش [۴] است. همچنین با توجه به شکل ۲ فرایند پیرولیز ذره لایکوپدیوم در دو مرحله اتفاق می‌افتد. اکنون با توجه به مشخص‌شدن بازه دمایی هر فرایند در طول حرارت‌دهی می‌توان از تحلیل ارائه‌شده در این تحقیق پارامترهای اساسی سینتیک هر یک از فرایندهای خشک‌شدن و پیرولیز را مطابق جدول‌های ۱ و ۲ محاسبه نمود (نرخ حرارت‌دهی برابر  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  است).



شکل ۱- منحنی DTG برحسب دما برای مدل ۴ ناحیه‌ای به‌دست آمده از روی داده‌های آزمایشگاهی [۴]



شکل ۲- منحنی TG و DTG برحسب دما برای مدل ۳ ناحیه‌ای ارائه‌شده توسط زیوکوا و همکارانش [۵]

جدول ۱- پارامترهای سینتیکی حاصل از مدل تحلیلی ۴ ناحیه‌ای

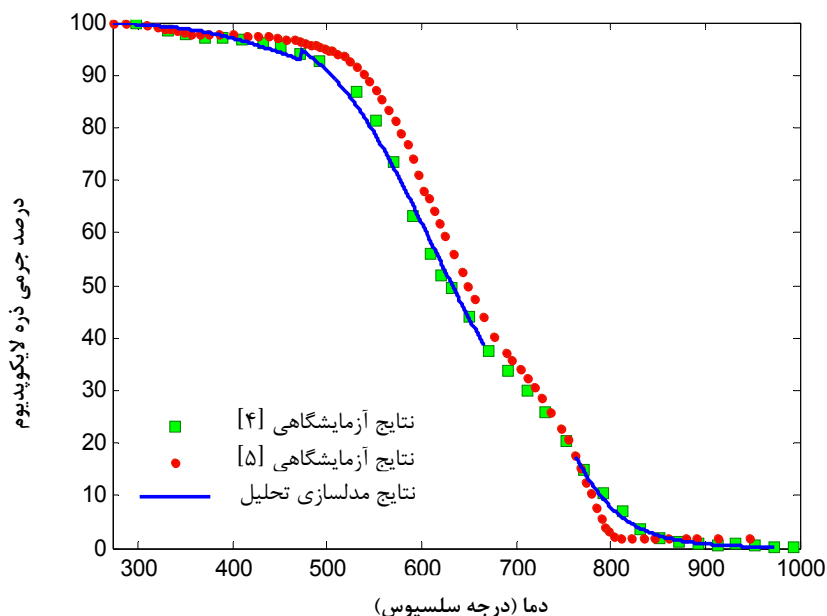
نام ناحیه	$T$ (°C)	$n$	$E_i$ (kJ/kmol)	$A_i$ (1/sec)
ناحیه ۱	۲۰۰ - ۰	۹	۱۶۴۲۳/۴۱	$۴/۷ \times ۱۰^{-۳}$
ناحیه ۲	۳۹۴ - ۲۰۰	۱/۸۶	۳۵۱۸۷/۰۱	۱/۳۴۶۷
ناحیه ۳	۴۹۰ - ۳۹۴	۱	۱۵۷۰۶/۱۱	$۱/۱ \times ۱۰^{-۲}$
ناحیه ۴	۷۰۰ - ۴۹۰	۱/۵۸	۷۷۱۷۵/۲۸	$۱/۵ \times ۱۰^{-۳}$

جدول ۲- پارامترهای سینتیکی حاصل از مدل تحلیلی ۳ ناحیه‌ای

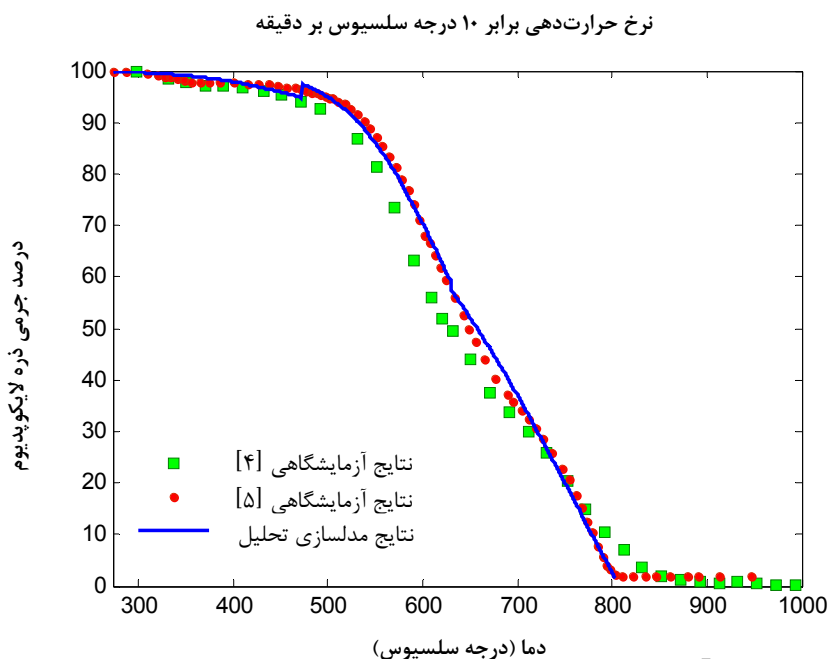
نام ناحیه	$T$ (°C)	$n$	$E_i$ (kJ/kmol)	$A_i$ (1/sec)
ناحیه ۱	۲۰۰ - ۰	۹	۱۵۴۲۳/۴۱	$۴/۷ \times ۱۰^{-۳}$
ناحیه ۲	۴۳۶ - ۲۰۰	۲	۴۲۶۶۱/۷۵	۵/۱۶۱۸
ناحیه ۳	۵۳۰ - ۴۳۶	۱/۱	۱۰۵۲۶/۱۷	$۱/۷ \times ۱۰^{-۳}$

شکل‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده در این کار را، که به ترتیب از برازش نتایج آزمایشگاهی [۴] و [۵] به دست آمده‌اند، نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها نتایج تحلیل ارائه شده در این کار تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و می‌توان به ثابت‌های سینتیکی به دست آمده در این تحلیل با درصد قابل ملاحظه‌ای اطمینان کرد. چنانکه خطای حاصل از هر دو مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (مطابق شکل‌های ۳ و ۴) کمتر از ۰/۰۱ است. شکل ۵ دمایی که در آن ۵۰ درصد جرم ذره پیرولیز می‌شود را برحسب نرخ حرارت‌دهی مختلف نشان می‌دهد.

نرخ حرارت‌دهی برابر ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه

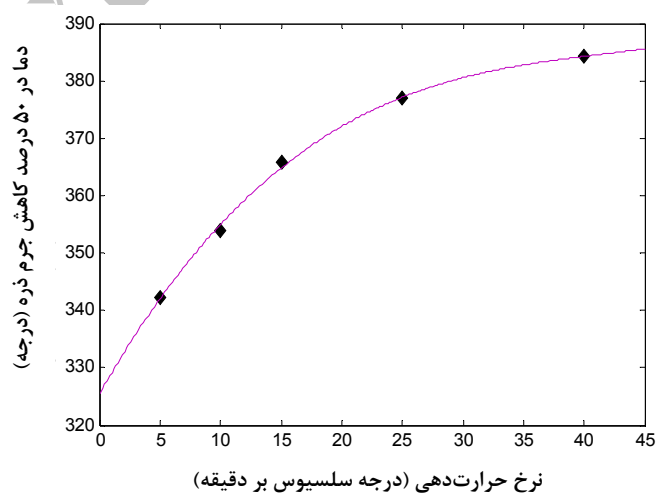


شکل ۳- درصد کسر وزنی ذره لایکوپدیوم برحسب دما برای مدل چهار ناحیه‌ای



شکل ۴- درصد کسر وزنی ذره لایکوپدیوم برحسب دما برای مدل سه ناحیه‌ای

طبق شکل ۵ مشاهده می‌شود دمایی که در آن ۵۰ درصد جرم ذره از بین می‌رود در نرخ حرارت‌دهی مختلف در بازه‌ای بین ۳۲۰-۳۹۰ درجه سلسیوس متغیر است. این دما در برخی مدل‌سازی‌های متداول قبلی [۶-۱۱] به‌عنوان دمای پیرولیز به‌صورت یک عدد فرضی مد نظر بود؛ یعنی به این صورت که دمای پیرولیز به‌صورت یک عدد ثابت و به‌عنوان دمای شروع پیرولیز ذره به مدل تحلیلی داده می‌شد. این در حالی است که مدل حاصل پیرولیز ذرات لایکوپدیوم را برحسب دما به‌صورت پیوسته مدل کرده است و می‌توان از این مدل پیرولیز (معادله شماره ۱) به همراه ضرایب سینتیکی تبخیر رطوبت و پیرولیز ذرات در آینده به‌عنوان مدل پیرولیز ابر ذرات لایکوپدیوم استفاده کرد. نکته قابل توجه اینکه روند موجود در شکل ۵ مطابق روند نتایج کار لاپوئرتا و همکارانش [۱۵، ۱۶] است.



شکل ۵- تغییرات دمای ۵۰ درصد کسر وزنی ذره برحسب نرخ حرارت‌دهی

## نتیجه گیری

در این کار ضمن استفاده از نتایج آزمایشگاهی قبلی و با استفاده از یک مدل سینتیکی، که برای مواد ارگانیک معرفی شده است، به بررسی تحلیلی فرایندهای خشک شدن رطوبت و مراحل پیرولیز ترکیبات مختلف موجود در داخل ذرات لایکوپدیوم پرداخته شده است. برای این کار از یک کد رایانه‌ای برای یافتن ضرایب سینتیکی بهره گرفته شده است. همچنین، برای حل این مدل از روش حداقل کردن مربعات استفاده شده است. نتیجه حاصل از تحلیل که پارامترهایی چون انرژی فعالسازی ( $E$ )، مرتبه واکنش هر یک از فرایندها ( $n$ ) و ضریب پیش‌نمایی آرنیوس ( $A$ ) را برای هر یک از نواحی موجود به دست می‌دهد، با نتایج موجود آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشانگر تطابق قابل قبول مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی موجود است. چنانکه خطای حاصل از هر دو مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (مطابق شکل‌های ۳ و ۴) کمتر از ۰/۰۱ است. همچنین با مقایسه خطاها مشاهده شد مدل ۴ ناحیه‌ای قابل اطمینان‌تر است. در نتیجه می‌توان از این مدل پیرولیز استفاده شده در این کار (معادله شماره ۱) به همراه ضرایب سینتیکی تبخیر رطوبت و پیرولیز ذرات (ارائه شده در جدول‌های ۱ یا ۲) در مدل‌های تحلیلی آینده برای پیرولیز ابر ذرات لایکوپدیوم استفاده کرد. همچنین، برای راحتی می‌توان از نتایج ارائه شده برای دمایی که در آن ۵۰ درصد جرم ذره از بین می‌رود استفاده و این دما را به عنوان دمای آغاز پیرولیز مورد استفاده قرار داد که این دما برای نرخ حرارت‌دهی‌های مختلف بین ۳۲۰ تا ۳۹۰ درجه سلسیوس است.

## فهرست علائم

$A$	ضریب پیش‌نمایی آرنیوس (1/sec)
$E$	انرژی فعالسازی (kJ/kmol)
$f(y_i^*)$	تعریف شده مطابق فرمول شماره (۳)
$f^*(y_i^*)$	تعریف شده مطابق فرمول شماره (۹)
$H$	نرخ حرارت‌دهی به ذرات ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
$K$	سرعت فرایند کاهش جرم مطابق معادله آرنیوسی (۲)، (1/sec)
$M$	جرم ذره (mg)
$n$	مرتبه واکنش
$R$	ثابت گازها (kJ/kmol.K)
$T$	دما (K)
$t$	زمان (sec)
$y_i^*$	کسر کاهش جرم ذره مطابق معادله (۴)

## زیرنویس‌ها

$S$	جامد
$\infty$	نقطه انتهای هر مرحله از فرایند کاهش جرم
$0$	نقطه ابتدایی هر مرحله از فرایند کاهش جرم
$i$	شماره هر مرحله

1. H. Beidaghy Dizaji, "Analysis of the Effect of Dimensionless Numbers on Organic Dust Combustion," MSc. Thesis, Iran University of Science and Technology (IUST), Department of Mechanical Engineering, 2011. (in Farsi)
2. H. Beidaghy Dizaji and M. Bidabadi, "Investigation of the Effect of Organic Lycopodium Particles Size on Dimensionless Numbers in Combustion Phenomena," *3st Iran Bioenergy Conference*, IRIB International Conference Center, Tehran, Iran, October 2012. (in Farsi)
3. L. Shiguang, X. Shaoping, L. Shuqin, Y. Chen and L. Qinghua, "Fast Pyrolysis of Biomass in Free-Fall Reactor for Hydrogen-Rich Gas," *Fuel Processing Technology*, 85, 2004, pp. 1201-1211.
4. O. S. Han, M. Yashima, T. Matsuda, H. Matsui, A. Miyake and T. Ogawa, "Behavior of Flames Propagating through Lycopodium Dust Clouds in a Vertical Duct," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, 2000, pp. 449-457.
5. Z. Zivcova, E. Gregorova and W. Pabst, "Porous Alumina Ceramics Produced with Lycopodium Spores as Pore-Forming Agents," *J. Mater. Sci.*, 42, 2007, pp. 8760-8764.
6. M. Bidabadi, A. Haghiri and A. Rahbari, "The effect of Lewis and Damköhler Numbers on the Flame Propagation through Micro-Organic Dust Particles," *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 2010, pp. 534-542.
7. A. Haghiri and M. Bidabadi, "Modeling of Laminar Flame Propagation through Organic Dust Cloud with Thermal Radiation Effect," *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 2010, pp. 1446-1456.
8. M. Bidabadi, H. Beidaghy Dizaji, F. Faraji Dizaji, and M. Safari Ghahsareh, "Effect of Thermal Radiation on Initiation of Flame Instability in Moisty Organic Dust Combustion," *20<sup>th</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME)*, Shiraz University, Shiraz, Iran, May 2012.
9. M. Bidabadi, F. Faraji Dizaji, H. Beidaghy Dizaji and M. Safari Ghahsareh, "Investigation of Effective Parameters on Flame Instability in Combustion of Organic Dust," *20<sup>th</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME)*, Shiraz University, Shiraz, Iran, May 2012.
10. H. Beidaghy Dizaji, M. Bidabadi, F. Faraji Dizaji and S. A. Mostafavi, "Effect of Dimensionless Numbers on Production of Energy from Moisty Organic Dust Particles," *3<sup>rd</sup> Iran Bioenergy Conference*, IRIB International Conference Center, Tehran, Iran, October 2012.
11. F. Faraji Dizaji, M. Bidabadi, H. Beidaghy Dizaji and S. A. Mostafavi, "Effect of Thermal Radiation on Modeling of Moisty Organic Dust Combustion," *3<sup>rd</sup> Iran Bioenergy Conference*, IRIB International Conference Center, Tehran, Iran, October 2012.
12. R. Z. Hu, *Thermal Analysis Kinetics*, Science Press of China, Beijing, 2001, pp. 28-29.
13. J. Rath, "Staudinger G. Cracking reactions of tar from pyrolysis of spruce wood," *Fuel*, 80, 2001, pp. 1379-1389.
14. O. Dung Tran and C. Rai, "A Kinetic Model for Pyrolysis of Douglas Fir Bark," *Fuel*, 57, 1978, pp. 293-298.
15. M. Lapuerta, J. J. Hernandez and J. Rodriguez, "Comparison between the Kinetics of Devolatilisation of Forestry and Agricultural Wastes from the Middle-South Regions of Spain," *Biomass and Bioenergy*, 31, 2007, pp. 13-19.
16. M. Lapuerta, J. J. Hernandez and J. Rodriguez, "Kinetics of Devolatilisation of Forestry Wastes from Thermogravimetric Analysis," *Biomass and Bioenergy*, 27, 2004, pp. 385-391.

## English Abstract

### **Analytical Study about the Kinetics of Different Processes in Pyrolysis of Lycopodium Dust**

**Hossein Beidaghy Dizaji and Mehdi Bidabadi**

**Department of Mechanical Engineering, Combustion Research Laboratory, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran**

(Received: 2012.11.23, Received in revised form: 2013.4.25, Accepted: 2013.5.31)

The effects of kinetics of drying and pyrolysis processes of organic particles such as lycopodium on analytical models of combustion of this type of particles are studied in this paper. DTG curves are investigated using experimental TGA curves and an analytical model for the kinetics of drying and pyrolysis processes of particles in combustion phenomena is presented. The results show excellent agreement between this analytical model and experimental results. It is possible to confidently use the results of this analytical model for future analytical models of lycopodium particles.

**Keywords:** Combustion of lycopodium particles, Kinetics of pyrolysis process, Kinetics of drying process