

تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما با استفاده از تجزیه حرارتی

مینا طهرانی زاده، احمد غضنفری مقدم* و حسن هاشمی پور رفسنجانی**

* نگارنده مسئول، نشانی: دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده کشاورزی، تلفن: ۰۳۴۱ ۳۲۰ ۲۶۲۶.

پیم نگار: aghazanfari@uk.ac.i

** به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی؛ استاد پژوهشکده باغبانی و دانشیار بخش

مهندسی شیمی دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۰/۲/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۶

چکیده

کربن فعال نوعی زغال است که از تجزیه حرارتی مواد آلی به دست می‌آید. کربن فعال دارای تخلخل بسیار زیادی است و از آن به عنوان فیلتر سیالات استفاده می‌شود. اخیراً از مواد کشاورزی مختلفی برای تهیه کربن فعال استفاده شده است. چوب نخل خرما با چگالی پایین و تخلخل بالا، پتانسیل خوبی برای تهیه این ماده دارد. در این پژوهش، با تجزیه حرارتی این چوب در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس و به مدت ۶۰ دقیقه، کربن فعال تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که از هر ۱۰۰ گرم چوب، حدود ۳۰ گرم کربن فعال با چگالی ۰/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب با عدد یدی ۵۸۵ میلی‌گرم بر گرم به دست می‌آید. فرایند کاهش جرم چوب در حین تجزیه حرارتی با یک مدل تحلیلی بررسی شد و با استفاده از آن ضریب انتشار مواد فرار چوب $10^{-8} \times 4/29$ مترمربع بر ثانیه تخمین زده شد. پیشرفت تجزیه حرارتی نیز با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی و این مدل به خوبی ($R^2=0/98$) در داده‌های آزمایشگاهی برازش شد. مدل اجزای محدود برای فرایند تجزیه حرارتی به دلیل در اختیار گذاشتن جزئیات بیشتری از روند تغییرات جرم بر مدل تحلیلی برتری داشت.

واژه‌های کلیدی

تجزیه حرارتی، چوب نخل خرما، کاهش جرم، کربن فعال، مدل‌سازی

مقدمه

خرما یکی از محصولات مهم باغی و استراتژیک خاورمیانه و شمال آفریقا است. در سال ۲۰۰۷، ایران با بیش از ۲۴۰ هزار هکتار سطح زیر کشت و تولید نزدیک به یک میلیون تن خرما، رتبه اول را در بین کشورهای تولید کننده خرما داشته است (Anon, 2011). هر سال به دلایل متعدد از جمله پیر شدن درختان یا اصلاح باغ‌ها، تعداد زیادی از نخل‌های خرما بریده می‌شوند و ضایعات با حجم نسبتاً زیادی تولید شده، که استفاده خاصی از آن‌ها

برده نمی‌شود، و اغلب سوزانده می‌شود. اخیراً استفاده از مواد لیگنوسولوزی برای تهیه کربن فعال مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. کربن فعال نوعی زغال با تخلخل بسیار بالاست و به عنوان جاذب (فیلتر) ناخالصی‌های سیالات کاربرد وسیعی دارد (Zhang et al., 2008). اصولاً موادی که دارای کربن بالا و مواد معدنی کمی هستند، از طریق تجزیه حرارتی، برای تولید کربن فعال استفاده می‌شوند. محصولات جانبی و ضایعات کشاورزی مانند تفاله چغندر قند، پوست بادام، پوست

را شامل می‌شود و از آن برای ارزیابی زمان تجزیه حرارتی، اندازه نمونه، تخلخل و چگالی کربن فعال به دست آمده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که اندازه و چگالی چوب با زمان فرایند رابطه مستقیم و با تخلخل محصول نسبت عکس دارد (Larfeldt et al., 2000).

در مطالعه تجزیه حرارتی تفاله چغندرقد، با در نظر گرفتن درصد اجزای تشکیل دهنده مواد اولیه و تعیین ثابت معادله آرنیوس، سرعت تجزیه حرارتی و دمای نمونه به عنوان تابعی از زمان بررسی شد (Sun et al., 2010). از روش حجم محدود (FVM) نیز برای توضیح چگونگی انتقال جرم و حرارت در چوب استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که افت جرم در دماهای پایین تدریجی و آرام است، اما در دماهای بالاتر سریع بوده و در زمانی کوتاه‌تر نمونه چوب به جرم نهایی مورد نظر می‌رسد (Sadhukhan et al., 2008).

چوب نخل خرما به دلیل داشتن الیاف زیاد برای تهیه زغال مناسب نیست و به صورت سنتی نیز از این چوب زغال تهیه نمی‌شود. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که از این چوب از طریق تجزیه حرارتی می‌توان کربن فعال تولید کرد (Khosroanjom & Ghazanfari, 2009). ولی این فرایند مورد بررسی علمی عمیق قرار نگرفته و خصوصیات کربن فعال به دست آمده نیز بررسی نشده است. در این پژوهش از چوب نخل خرما، برای تولید کربن فعال به روش تجزیه حرارتی استفاده و خواص کربن فعال به دست آمده نیز بررسی شد.

فرایند کاهش جرم در حین تجزیه حرارتی چوب با استفاده از روش اجزای محدود بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

چوب نخل خرما مورد نیاز از منطقه شههاد در شهرستان کرمان تهیه شد. در ابتدا چوب به قطعات کوچک مکعب مستطیلی بریده و قطعات بریده شده به

نارگیل، الیاف نخل و سبوس برنج از موادی هستند که برای تولید کربن فعال به کار رفته‌اند (Ioannidou et al., 2007).

در فرایند تجزیه حرارتی، مواد لیگنوسلولزی در محیط یک گاز بی‌اثر تحت تأثیر دمای ۸۰۰-۴۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند و رطوبت و مواد فرار از آن‌ها خارج می‌شود. در اثر خروج مواد فرار، زغال به جا مانده تخلخل بسیار بالایی دارد که از آن به عنوان کربن فعال برای فیلتر کردن سیالات استفاده می‌شود (Ioannidou et al., 2007). نتایج بررسی تأثیر دما و اندازه چوب راش روی درصد کربن فعال نشان می‌دهد که در دمای ۵۴۰ درجه سلسیوس تجزیه حرارتی به طور کامل انجام می‌شود. در دمای یکسان نیز با کاهش اندازه چوب، زمان فرایند تجزیه حرارتی کاهش می‌یابد (Guillain et al., 2009). نتایج آزمایش‌ها روی تجزیه حرارتی چوب کاج در اندازه‌های مختلف در دمای ۶۰۰-۲۵۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که زمان فرایند با کاهش اندازه چوب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای فرایند می‌توان زمان تجزیه حرارتی و مقدار جرم باقیمانده نهایی را کاهش داد (Sadhukhan et al., 2008). بهترین دمای تجزیه حرارتی برای چوب موز جهت تهیه کربن فعال، ۵۰۰ درجه سلسیوس گزارش شده و در دماهای بالاتر سطح ویژه کربن فعال کاهش می‌یابد (Fu et al., 2009). بهترین دما برای تجزیه حرارتی چوب سپیدار نیز ۴۵۰ درجه سلسیوس گزارش شده است (Shen et al., 2007).

بررسی چگونگی فرایند کاهش جرم و تغییرات دما در حین فرایند تجزیه حرارتی و مدل‌سازی این فرایند مورد توجه محققان بوده است. انتقال جرم و حرارت در حین فرایند تجزیه حرارتی در حضور گاز نیتروژن روی چوب سپیدار در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به روش عددی مدل‌سازی و بررسی شد. مدل مذکور اثر سرعت گاز ورودی، تغییر چگالی نمونه و تغییر حجم در حین فرایند

تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما...

تغییرات جرم را در برابر تغییرات دمایی نشان می‌دهد. با بررسی نمودار تجزیه حرارتی، دمای شروع، سرعت تجزیه و دمای پایانی تجزیه حرارتی جسم مشخص می‌شود (Krziesinska et al., 2008).

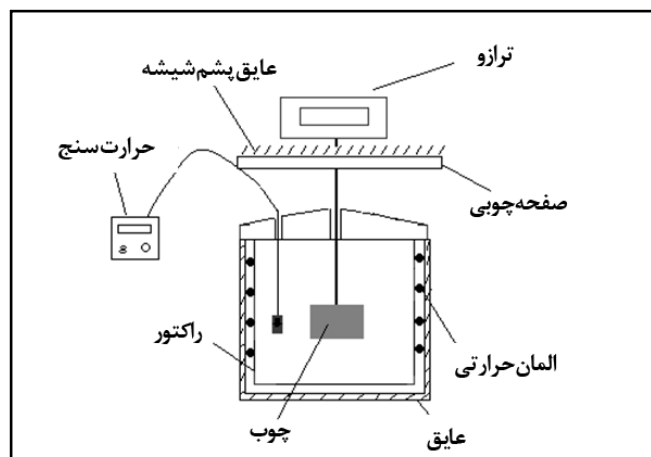
تهیه کربن فعال و ارزیابی آن

برای تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما، از یک ظرف چدنی سرپوش دار (راکتور) استفاده شد. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، سرپوش راکتور به طور کامل با نخ نسوز آب‌بندی شد. برای اندازه‌گیری دمای درون راکتور یک مجرا در سرپوش راکتور تعبیه و از درون آن یک ترموکوپل عبور داده شد. این ترموکوپل (AT 800K-ATBIN 8952) دما را روی یک صفحه نمایش نشان می‌دهد. قطعه چوب به سیمی آویزان گردید که از درون مجرای دیگر سرپوش راکتور عبور داده شده بود. این سیم به یک ترازوی دیجیتالی (TASH Balance TD4001) وصل بود که جرم قطعه را در هر لحظه با دقت ۰/۰۱ گرم نشان می‌داد.

برای جلوگیری از تأثیر دما بر دقت ترازو، بین ترازو و راکتور یک صفحه چوبی عایق شده با پشم شیشه قرار داده شد. طرح‌واره راکتور و تجهیزات جانبی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدت دو هفته در محیط آزمایشگاه نگهداری شد، تا با محیط به رطوبت تعادل برسد. پس از آن با قرار دادن چند نمونه با جرم حدود ۱۰۰ گرم در آن با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس رطوبت چوب تعیین شد (ASTM E871). برای آگاهی از مواد تشکیل‌دهنده چوب، ۲۰۰ گرم نمونه خشک شده در یک راکتور قرار داده و در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. با اندازه‌گیری جرم ماده باقیمانده مقدار فرار نمونه اندازه‌گیری شد (ASTM D6330-98). برای تعیین درصد خاکستر (مواد معدنی)، ۵ گرم نمونه درون یک بوتله چینی در کوره با دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت قرار داده شد. جرم ماده باقیمانده در بوتله چینی به عنوان مقدار خاکستر موجود در نمونه چوب در نظر گرفته شد (ASTM E1534-93). با کم کردن مجموع درصد مواد فرار و خاکستر از عدد ۱۰۰، درصد کربن خالص^۱ در کربن فعال محاسبه شد.

برای بررسی خصوصیات حرارتی چوب، یک نمونه از آن با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی (STA NETZSCH PC (Luxx 409 - مورد تجزیه حرارتی (TGA) قرار داده شد. در این آنالیز، نمونه چوب از دمای ۲۵ تا ۸۵۰ درجه سلسیوس در حضور گاز نیتروژن با سرعت ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه حرارت داده شد. آنالیز حرارتی،



شکل ۱- طرح‌واره راکتور استفاده شده برای تهیه کربن فعال.

تیوسولفات سدیم تیتراسیون شد تا بی‌رنگ شود، حجم مصرفی تیوسولفات سدیم (A) برحسب میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد. برای تعیین مصرفی شاهد، چند قطره چسب نشاسته در ۱۰ میلی‌لیتر محلول یدی ریخته و با استفاده از تیوسولفات سدیم تیتراسیون انجام شد و حجم تیوسولفات سدیم مصرفی (B) برحسب میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد و عدد یدی با رابطه ۱ محاسبه شد (Suzuki et al., 2007).

$$I_n = 2540(B^2 - BA) \quad (1)$$

بررسی روند کاهش جرم در چوب

طی فرایند تجزیه حرارتی، برخی از مواد درون چوب مانند رطوبت، مواد آلی فرار و گازهای مختلف از آن خارج می‌شوند. سرعت و میزان خروج این مواد از چوب، به عوامل مختلف از جمله دمای راکتور، نوع چوب و فشار درون راکتور بستگی دارد. همان‌طور که افزایش دمای چوب از قسمت‌های سطحی آغاز می‌شود، کاهش جرم نیز از سطح چوب آغاز می‌شود و به قسمت‌های داخلی گسترش می‌یابد.

تغییرات جرم مواد فراری که طی فرایند تجزیه حرارتی می‌توانند از چوب خارج شوند (M) نسبت به زمان (t) تابع قانون انتشار فیک است که در دو بعد x و y به صورت زیر بیان می‌شود (Vega-Galves et al., 2010):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، D ضریب انتشار جرم مواد فرار بر حسب مترمربع بر ثانیه است و بستگی به نوع ماده و شرایط آزمایش دارد. ضریب انتشار، شاخصی برای سرعت خروج مواد فرار از جسم است و با افزایش این ضریب، زمان لازم برای خروج کامل مواد از نمونه کاهش می‌یابد.

برای تهیه کربن فعال، قطعات چوب پس از بریده شدن در ابعاد ۲×۴×۱۰ سانتی‌متر با دقت ۰/۰۱ گرم وزن و درون راکتور آویزان شدند. حرارت مورد نیاز با یک المان حرارتی ۱۵۰۰ وات تأمین و تجزیه حرارتی در دمای ۴۵۰±۵ درجه سلسیوس انجام شد. در حین آزمایش، داده‌های مربوط به تغییرات جرم نمونه در فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. پس از پایان تجزیه حرارتی (ثابت شدن جرم نمونه) حرارت‌دهی قطع و نمونه درون راکتور به آرامی سرد شد. درصد کربن فعال به‌دست آمده با استفاده از جرم نهایی مواد درون راکتور و جرم اولیه چوب محاسبه گردید.

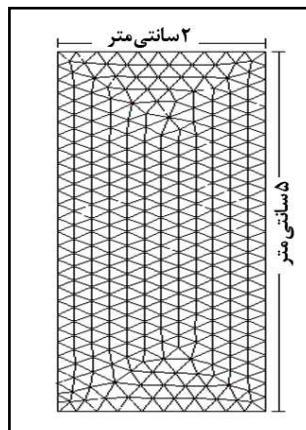
چگالی ظاهری یکی از پارامترهای مشخص‌کننده ساختار فیزیکی کربن فعال است. کاهش چگالی، مبین افزایش حجم حفره‌ها و تخلخل نمونه آزمایشی است و کیفیت کربن فعال تولیدی را تعیین می‌کند. برای تعیین چگالی، کربن فعال به جای مانده در داخل راکتور با سمباده به شکل قطعات مکعبی پرداخت شد. حجم این قطعات با کولیس و جرم هر یک با یک ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. با استفاده از این دو متغیر چگالی متوسط کربن فعال به‌دست آمد.

عدد یدی (I_n) یکی از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت کربن فعال است (Przepiorski, 2006). این عدد شاخصی از سطح ویژه یا تخلخل کربن فعال و تعیین‌کننده میزان توانایی کربن فعال در جذب ناخالصی‌هاست. عدد یدی برای کربن فعال به‌دست آمده با استفاده از روش استاندارد ASTM D4607 تعیین شد. در این روش، ۰/۲ گرم از پودر کربن فعال به ۴۰ میلی‌لیتر محلول یدی ۰/۱ نرمال اضافه و مخلوط به هم زده شد. پس از فیلتر شدن محلول با کاغذ صافی، چند قطره چسب نشاسته به این محلول اضافه شد تا تغییر رنگ دهد. این محلول با

تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما...

در این تحقیق نیز برای تعیین ضریب انتشار مواد فرار در حین تجزیه حرارتی چوب از رابطه ۶ استفاده شد. بدین منظور جرم نمونه چوب از ابتدای آزمایش در فواصل زمانی مشخص اندازه گیری، ثبت، و با استفاده از آن‌ها نسبت جرم در هر لحظه (MR) محاسبه شد. داده‌های زمان و نسبت جرم در نرم‌افزار MATLAB (MATLABR2007a) وارد و با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی^۱ مقدار D تخمین زده شد.

روند تغییر جرم در قسمت‌های مختلف چوب با استفاده از مدل کاهش جرم (رابطه ۲) در نرم‌افزار ANSYS 10.0 به روش اجزای محدود بررسی شد. در این بررسی، هر قطعه چوب به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شد. با توجه به متقارن بودن قطعه، از راستای z (ضخامت) صرف‌نظر و در نتیجه روند تغییرات جرم با استفاده از یک مستطیل 2×5 سانتی‌متر که نشان‌دهنده $1/4$ وجه بزرگ‌تر قطعه بود بررسی شد. در نرم‌افزار، هر مستطیل با اجزاء مثلثی ۶ گرهی المان‌بندی و در مجموع هر مستطیل به ۶۰۸ المان و ۱۲۸۹ گره تقسیم شد. این المان‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. ضریب انتشار، (D)، که با استفاده از مدل تحلیلی (رابطه ۶) محاسبه شده بود و نسبت جرم (MR) در آغاز و پایان فرایند (شرایط مرزی) به نرم‌افزار داده شد و نسبت جرم در هر گره در زمان‌های معین تخمین زده شد.



شکل ۲ - چگونگی نمایش هندسی $1/4$ وجه بزرگ‌تر در نرم‌افزار ANSYS.

جواب تحلیلی رابطه (۲) برای شکل هندسی مکعب مستطیل با ضخامت $2L$ به صورت زیر بیان می‌شود (Berruti et al., 2009):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-D\pi^2 t}{4L^2}\right] + \frac{8}{9\pi^2} \exp\left[\frac{-9D\pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

در رابطه ۳، MR نسبت جرم است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Mr = \frac{M - M_f}{M_i - M_f} \quad (4)$$

M و M_f ، M_i به ترتیب جرم مواد خارج شده اولیه، جرم مواد خارج شده نهایی و جرم مواد خارج شده در هر لحظه از چوب هستند. مقدار M (به صورت اعشاری) در هر لحظه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M = \frac{m - m_f}{m_i} \quad (5)$$

در رابطه ۵، m و m_f و m_i به ترتیب جرم چوب در هر لحظه، جرم نهایی چوب و جرم اولیه چوب هستند.

برای تخمین ضریب انتشار مواد فرار (D)، در اکثر مواقع تنها از جمله اول جواب تحلیلی رابطه (۳) به صورت زیر استفاده می‌شود (Berruti et al., 2009):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-D\pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (6)$$

بهرتر برازش شدن مدل در داده‌های حقیقی است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه چوب نخل خرما در جدول (۱) ذکر و با تعدادی از محصولات کشاورزی مقایسه شده است. مواد فرار نزدیک به ۷۰ درصد چوب را تشکیل می‌دهند که می‌توانند به همراه رطوبت در حین فرایند تجزیه حرارتی از چوب خارج شوند. مواد باقیمانده، کربن خالص و خاکستر هستند که در حقیقت ماده اصلی کربن فعال را تشکیل می‌دهند. کربن خالص چوب خرما ۲۳/۱ درصد است که در مقایسه با سایر موارد ذکر شده، بیشتر است. در مقابل، خاکستر چوب خرما از خاکستر چوب کاج و پوست نارگیل بیشتر ولی از سبوس برنج خیلی کمتر است. در مجموع، این جدول نشان می‌دهد که چوب خرما پتانسیل خوبی برای تهیه کربن فعال دارد و کربن فعال آن نیز می‌تواند مرغوب باشد.

برای ارزیابی مدل اجزای محدود، میانگین مقادیر MR در گره‌های مختلف، که با مدل اجزای محدود تخمین زده شده بود، در هر فاصله زمانی محاسبه شد. میانگین‌های به‌دست آمده و مقادیر MR تخمین زده شده با استفاده از مدل تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی از طریق رسم نمودار آن‌ها و محاسبه R^2 مقایسه شدند. علاوه بر رسم منحنی‌های مربوط، مقدار ریشه دوم میانگین خطاها ($RSME$) برای داده‌های هر مدل و داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(MR_m - MR_r)^2}{n}} \quad (7)$$

در این رابطه، MR_m و MR_r به ترتیب نسبت جرم محاسبه شده با مدل و داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد فواصل زمانی است. در ارزیابی مدل‌ها هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر و مقدار $RSME$ کوچکتر باشد نشان‌دهنده

جدول ۱- مقایسه درصد مواد تشکیل‌دهنده چوب نخل خرما با مواد تشکیل‌دهنده برخی از مواد کشاورزی

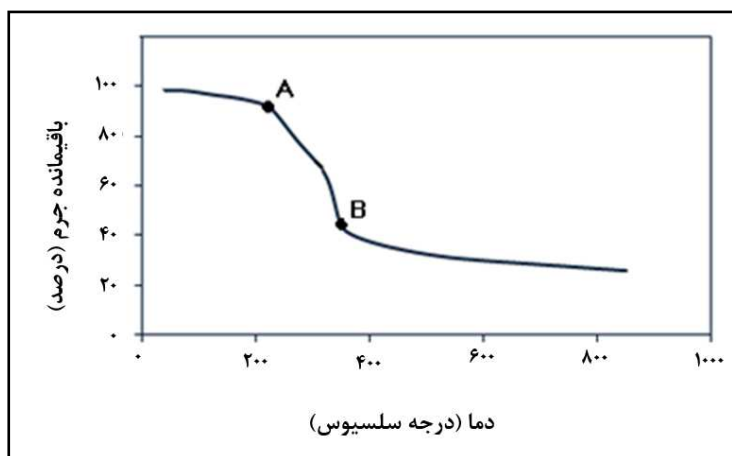
اجزا تشکیل‌دهنده	چوب نخل خرما	چوب کاج ^۱	سبوس برنج ^۲	پوست نارگیل ^۳
مواد فرار	۶۹/۶	۷۸/۰۹	۶۲	۷۸/۳
خاکستر	۵/۹	۰/۴۵	۱۶/۱	۰/۷۴
رطوبت	۱/۴	۷/۷۴	۴/۲	۱۰/۵۳
کربن خالص	۲۳/۱	۱۳/۷۲	۱۷/۷	۲۰/۹۶

1. (Hared et al., 2007), 2. (Kalderis et al., 2008), 3. (Li et al., 2008)

حفره‌هایی درون چوب ایجاد می‌شود که بر اثر آن‌ها چگالی چوب کاهش و سطح ویژه آن افزایش می‌یابد. پس از نقطه B، افت جرم کاهش می‌یابد. از این بررسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه حرارتی چوب نخل خرما می‌تواند در دمایی بین ۴۰۰-۶۰۰ درجه سلسیوس باشد.

نمودار حاصل از تجزیه حرارتی چوب نخل خرما در شکل (۳) نشان می‌دهد که کاهش جرم قبل از نقطه A ($\sim 220^\circ$) ناچیز و ناشی از تبخیر آب موجود در نمونه است. بین نقاط A و B کاهش شدیدی در جرم نمونه رخ می‌دهد زیرا از ابتدای این ناحیه، مواد فرار شروع به تجزیه شدن و خروج از چوب می‌کنند. با تجزیه این مواد،

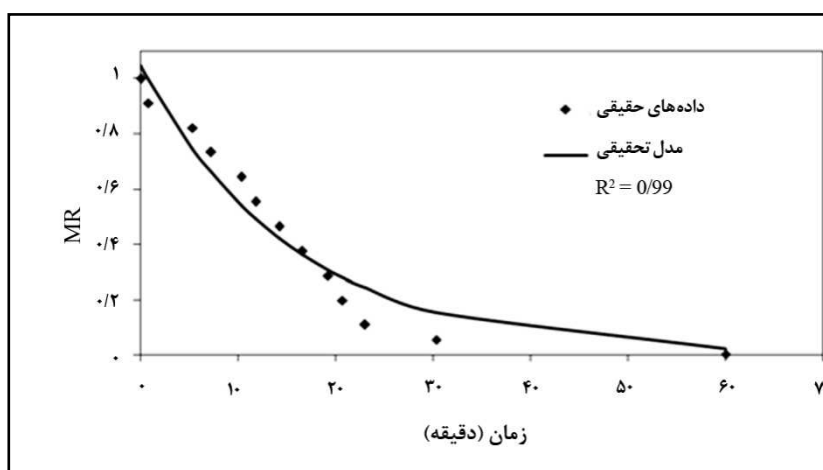
تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما...



شکل ۳- نمودار آنالیز حرارتی (TGA) چوب نخل خرما.

(رابطه ۶) در این داده‌ها را نشان می‌دهد. این مدل به مقدار نسبتاً خوبی ($R^2=0/99$) در داده‌های آزمایشگاهی برازش شده است. مقدار ضریب انتشار، D ، برای چوب نخل خرما با استفاده از رابطه ۶ برابر با $4/29 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه محاسبه شد.

نمودار چگونگی کاهش جرم چوب در حین تجزیه حرارتی در شکل ۴ نشان می‌دهد که تا ۳۰ دقیقه پس از شروع فرایند تجزیه حرارتی، جرم چوب به شدت افت می‌کند و پس از آن افت جرم با شدت بسیار کمتری ادامه می‌یابد. خط پیوسته در این نمودار برازش مدل تحلیلی



شکل ۴ - روند کاهش نسبت جرم در چوب در طی فرایند تجزیه حرارت.

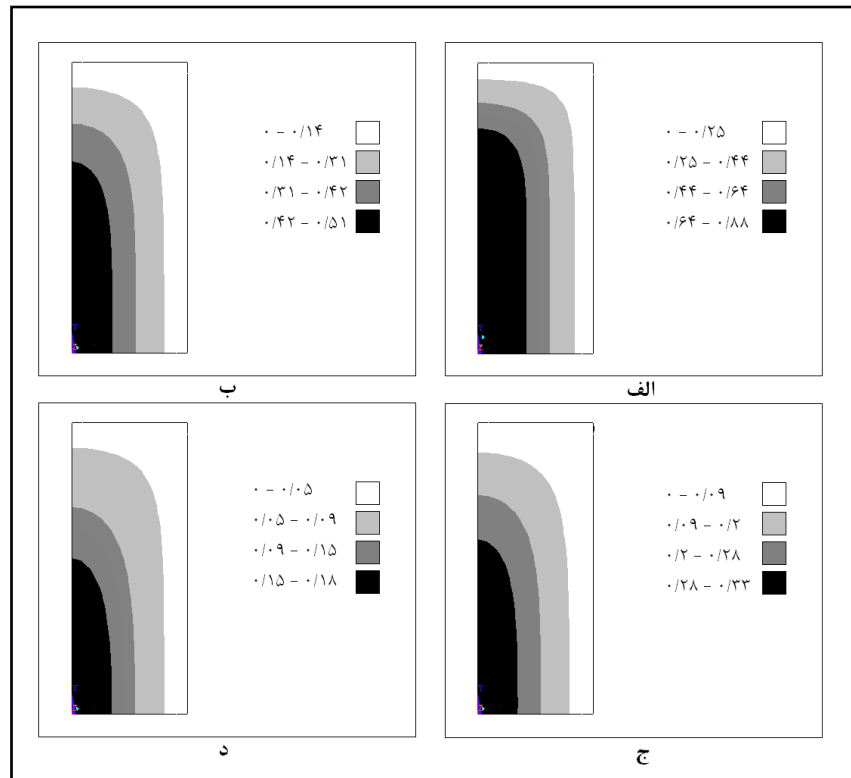
آمده برای کربن فعال تهیه شده از چوب نخل خرما نشان‌دهنده کیفیت خوب آن است. عدد یدی که بیانگر سطح ویژه کربن فعال است برای نمونه‌های کربن فعال به‌طور متوسط ۵۸۵ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد. در منابع مختلف این عدد برای ضایعات کشاورزی از ۳۵۰ تا

چگالی محاسبه شده برای کربن فعال ب ۰/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در حالی که چگالی کربن فعال حاصل از پوست نارگیل ۰/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شده است (Li et al., 2008). چگالی پایین از ویژگی‌های مهم کربن فعال بوده و چگالی پایین به‌دست

نمونه را نشان می‌دهد که با نرم افزار ANSYS برای مراحل مختلف تجزیه حرارتی تولید شده‌اند. همان‌طور که مشخص است گرادیان *MR* در مراحل اولیه تجزیه حرارتی بین لایه‌های بیرونی و درونی نمونه زیاد است و به تدریج کم می‌شود. شکل (۵-د) نشان می‌دهد که پس از گذشت یک ساعت، هنوز هم در قسمت مرکزی تمرکز جرم بیشتر است تا در قسمت‌های سطحی. برای این‌که این گرادیان جرم کاهش یابد، می‌توان قطعات چوب را کوچکتر در نظر گرفت یا قبل از تجزیه حرارتی آن‌ها را آسیاب کرد.

۱۱۰۰ میلی‌گرم بر گرم گزارش شده است (Li *et al.*, 2008, Gergova *et al.*, 1994). منابع بیانگر این موضوع هستند که با افزایش دمای تجزیه حرارتی، مقدار عدد یدی نیز افزایش می‌یابد و با تغییر و بهبود شرایط تولید می‌توان کیفیت کربن فعال را بهبود بخشید (Suzuki *et al.*, 2007).

از این‌رو با تغییر شرایط تولید می‌توان از چوب نخل خرما کربن فعال با عدد یدی بالاتری به‌دست آورد. شکل ۵ نمودارهای کاهش جرم در سطح مقطع یک



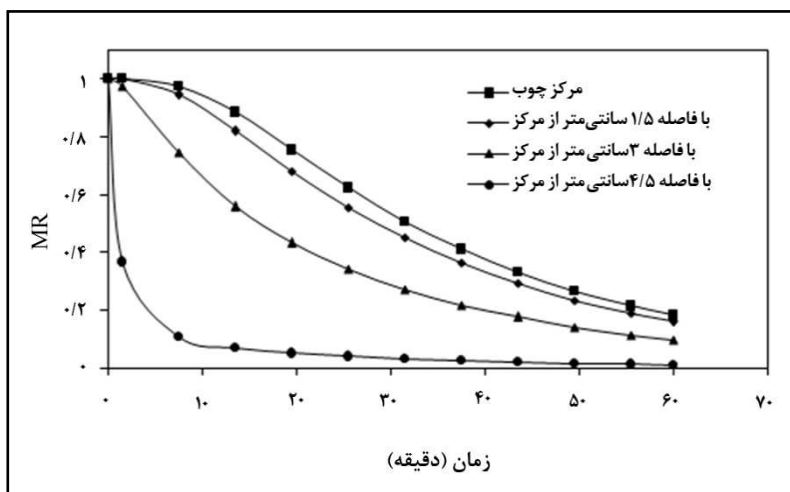
شکل ۵ - گرادیان نسبت جرم (*MR*) در چوب پس از گذشت الف) ۱۵، ب) ۳۰، ج) ۴۵ و د) ۶۰ دقیقه.

فاصله دارد، پس از حدود ۱۰ دقیقه از آغاز فرایند، *MR* معادل با ۰/۱ دارد و زمان باقیمانده را با شیب کم و در نتیجه با سرعت کاهش جرم پایین طی می‌کند. در مقابل کاهش جرم در مرکز، در ۱۵ دقیقه ابتدای فرایند سرعت کمی داشته و پس از آن با سرعتی متوسط (شیب کم

در شکل ۶، تغییرات *MR* در گره‌ها با فواصل مختلف از مرکز مستطیل المان‌بندی شده نشان داده شده است. روند کلی تغییرات منحنی‌ها نشان می‌دهد که سرعت کاهش جرم با فاصله نقاط از مرکز نسبت عکس دارد. این نمودار نشان می‌دهد نقطه‌ای که ۴/۵ سانتی‌متر از مرکز

تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما...

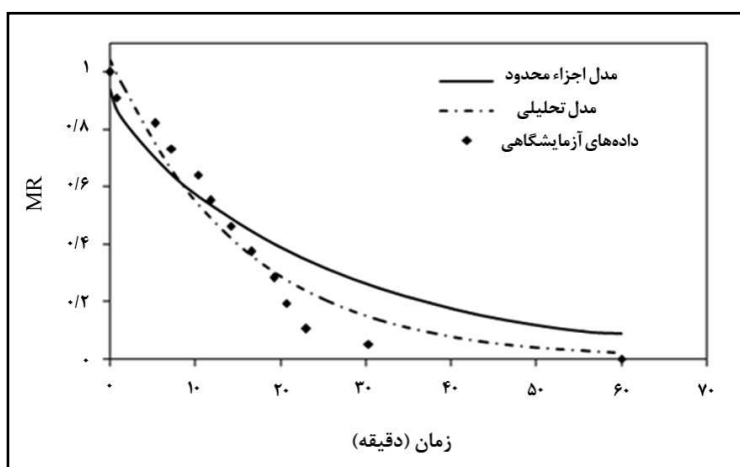
منحنی) افت جرم در آن رخ می‌دهد. روند کاهش جرم با دور شدن از مرکز با سرعت بیشتری پیش می‌رود به طوری که پس از گذشت حدود ۱۴ دقیقه از آغاز فرایند، مرکز چوب نسبت جرم ۰/۸۸ و دورترین نقطه از مرکز نسبت جرم ۰/۰۷ را دارد.



شکل ۶ - مقایسه روند کاهش جرم نقاط مختلف از چوب.

برای این دو مدل به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۱۶ محاسبه شد. این اعداد نشان می‌دهند که در مجموع این دو مدل تفاوت چندانی در نمایش روند کلی کاهش جرم در چوب ندارند ولی مدل اجزای محدود جزئیات بیشتری از تغییرات جرم در زمان‌های مختلف را در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد و از این نظر بر مدل تحلیلی برتر است.

مقایسه کلی مدل اجزای محدود و مدل تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر دو مدل روند کاهش جرم را به خوبی توجیه می‌کنند. مقدار ضریب تبیین (R^2) برای مدل اجزای محدود ۰/۹۸ و برای مدل تحلیلی ۰/۹۹ به دست آمد. مقدار ریشه دوم میانگین خطاها ($RSME$)



شکل ۷ - مقایسه دو مدل عبور داده شده از داده‌های آزمایشگاهی.

نتیجه‌گیری

قطعه چوب نخل خرما حدود ۳۰ گرم کربن فعال با چگالی ۰/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و عدد یدی ۵۸۵ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد که نشان‌دهنده کیفیت خوب این کربن است.

۴- مقدار ضریب انتشار مواد فرار چوب با استفاده از مدل تحلیلی $4/29 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه بدست آمد.

۵- استفاده از دو مدل تحلیلی و اجزای محدود برای نمایش روند کلی کاهش جرم در چوب در حین فرایند تجزیه حرارتی نشان می‌دهد که هر دو مدل به خوبی قادر به نمایش این روند هستند، ولی مدل اجزای محدود به دلیل نمایش جزئیات برتری دارد.

در این تحقیق، با استفاده از روش تجزیه حرارتی، از چوب نخل خرما برای تولید کربن فعال در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس استفاده شد. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- چوب نخل خرما با چگالی پایین و تخلخل بالا پتانسیل خوبی برای تولید کربن فعال دارد.

۲- در شرایط آزمایش شده، فرایند تجزیه حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس برای تهیه کربن فعال از چوب نخل خرما حدود ۶۰-۴۰ دقیقه به طول می‌انجامد.

۳- در فرایند تجزیه حرارتی انجام شده، از هر ۱۰۰ گرم

مراجع

- Anon. 2011. Date. J. Baghdar. Hort. Sci. Related Industries. 37(5). (in Farsi)
- Berruti, F. M. Klaas, M. Briens, C. and Berruti, F. 2009. Model for convective drying of carrots for pyrolysis. J. Food Eng. 92(2): 196-201.
- Fu, P., Hu, S., Sun, L. Xiang, J., Yang, T., Zhang, A. and Zhang, J. 2009. Structural evolution of maize stalk/char particles during pyrolysis. Bioresour. Technol. 100(20): 4877-4883
- Gergova, K., Petrov, N. and Eser, S. 1994. Adsorption properties and microstructure of activated carbons produced from agricultural by-products by steam pyrolysis. Carbon. 32, 693-702.
- Guillain, M. Fairouz, K. Mar, S. R. Monique, F. and Jacques, L. 2009. Attrition-free pyrolysis to produce bio-oil and char. Bioresour. Technol. 100(23): 6069-6075.
- Hared, I. A., Dirion, J. L., Salvador, S., Lacroix, M. and Rio, S. 2007. Pyrolysis of wood impregnated with phosphoric acid for the production of activated carbon: Kinetics and porosity development studies. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 79(1-2): 101-105.
- Ioannidou, O. and Zabaniatou, A. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production -A review. Renew. Sust. Energ. Rev. 11(9): 1966-2005
- Kalderis, D., Bethanis, S., Paraskeva, P. and Diamadopoulos, E. 2008. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. Bioresour. Technol. 99(15): 6809-6819.
- Khosroanjom, F. and Ghazanfari, A. 2009. Investigation of prepare charcoal from date wood by pyrolysis. Proceedings of the 2th Agricultural Biotechnology Conference. Jul. 15-16. (in Farsi)
- Krzesinska, M., Zachariasz, J., Muszynski, J. and Czajkowska, S. 2008. The thermal decomposition studies of solid iron bamboo (*dendrocalamus strictus*) -potential precursor for eco-materials. Bioresour. Technol. 99(11): 5110-5114

- Larfeldt, J., Leckner, B. and Melaaen, M. C. 2000. Modelling and measurements of the pyrolysis of large wood particles. *Fuel*. 79, 1637-1643
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S. and Xia, H. 2008. Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Ind. Crops Prod.* 28, 190-198.
- Przepiorski, J. 2006. Activated Carbon Filters and Their Industrial Applications. In: Bandosz, T. J. (Ed.) *Interface Science and Technology. Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation.* 421-474.
- Sadhukhan, A. K., Gupta, P. and Saha, R. K. 2008. Modeling and experimental studies on pyrolysis of biomass particles. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 81(2): 183-192.
- Shen, D. K., Fang, M. X., Luo, Z. Y. and Cen, K. F. 2007. Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux. *Fire Safety J.* 42(3): 210-217.
- Sun, L., Chen, J. Y., Negulescu, I. I., Moore, M. A. and Collier B. J. 2010. Kinetic modeling of dynamic pyrolysis of bagasse fiber. *Bioresour. Technol.* 102(2) 1951-1958.
- Suzuki, R. M., Andrade, A. D., Sousa, J. C. and Rollemberg, M. C. 2007. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresour. Technol.* 98(10): 1985-1991.
- Vega-Galves, A., Miranda, M., Diaz, L. P., Lopez, L., Rodriguez, K. and Di Scala, K. 2010. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modeling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresour. Technol.* 101(19): 7265-7270.
- Zhang, J., Shi, Q., Zhang, C., Xu, J., Zhai, B. and Zhang, B. 2008. Adsorption of Neutral Red onto Mn-impregnated activated carbons prepared from *Typha* Orientals. *Bioresour. technol.* 99(18): 8974-8980.

Pyrolysis of Date Palm Trunks to Produce Active Carbon

M. Tehranizadeh, A. Ghazanfari-Moghaddam* and H. Hashemipour-Rafsanjani

* Corresponding Author: Professor, Horticultural Institute, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
E-Mail: aghazanfari@uk.ac.i

Received: 23 April 2011, Accepted: 14 April 2012

Active carbon is char derived from pyrolysis of organic materials. It has a high porosity level and is used to filter fluids. Many types of agricultural materials are used to produce active carbon. The trunk of the date palm, with its low density and high porosity, has great potential for producing active carbon. In this research, the bark was pyrolyzed at 450°C for 60 min to produce active carbon. The results indicated that 100 g of wood produced 30 g of active carbon. The density of the active carbon was 0.12 g/cm² and its iodine number was 585 mg/g. The pyrolysis of the wood was studied using an analytical model and the coefficient of diffusion for volatile compounds leaving the wood was estimated to be 4.29×10^{-8} m²/s. The progress of the pyrolysis was modeled using the finite element method and showed the model was well fitted to the experimental data ($R^2 = 0.98$). The finite element model was superior to the analytical model because it presented more details of the weight changes in the wood during pyrolysis.

Keywords: Active carbon, Date palm trunk, Mass transfer, Modeling, Pyrolysis