

## مطالعه‌ی فرآیند گرماکافت بستر ثابت روی چوب هرس درختان شهری در جو اکسایشی

احمد پیری<sup>۱\*</sup>، علی محمد نیکبخت<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۳)

### چکیده

در این تحقیق اثر حضور اکسیژن بر فرآیند گرماکافت ضایعات چوب مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مکعبی در ابعاد ۲/۵ سانتی‌متر در دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس در جو اکسایشی گرماکافت شدند. دمای سطح و مرکز نمونه‌ها اندازه‌گیری و کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزایش دما باعث افزایش سرعت گرماکافت و افزایش نرخ تغییرات دما می‌شود. همچنین دمای سطح نمونه‌ها در گرماکافت اکسایشی به‌طور متوسط ۱۰۰ درجه سلسیوس بیشتر از گرماکافت در جو بی‌اثر است که به معنی کاهش مصرف زمان و به تبع آن کاهش استفاده‌ی انرژی در فرآیند گرماکافت اکسایشی می‌باشد. با توجه به ماهیت غیرخطی فرآیند گرماکافت ضایعات چوب، شبکه‌های عصبی مصنوعی با سه فاکتور زمان، اندازه‌ی قطعات و دمای واکنش به عنوان متغیرهای ورودی به کار گرفته شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۸ و ۰/۹۹۹۱ تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت.

**واژه‌های کلیدی:** ضایعات چوب، گرماکافت اکسایشی، تغییرات دما، کسر اتلاف جرمی، شبکه عصبی مصنوعی

### مقدمه

دفن ضایعات حاصل از هرس درختان و سوزاندن در محیط‌های شهری یکی از مشکلات جوامع امروزی می‌باشد که باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود. با تبدیل این ضایعات، علاوه بر جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی، می‌توان به مواد با ارزش‌تری دست یافت. زیست‌توده ممکن است با استفاده از تعدادی از فرآیندهای فیزیکی، ترموشیمیایی و بیوشیمیایی به سوخت‌های زیستی تبدیل شود (Sharma et al, 2015). فرآیندهای ترموشیمیایی عبارتند از سوزاندن، گازی‌سازی، گرماکافت و مایع‌سازی هیدروترمال. در فرآیند گرماکافت، زیست‌توده با حرارت دادن در غیاب اکسیژن به یک جامد غنی از کربن و مواد فرار تبدیل می‌شود (Demirbas and Arin, 2002). محصولات گرماکافت به سه دسته‌ی اصلی تقسیم بندی می‌شوند: بیوجار، محصولات چگال‌پذیر (قیرها، هیدروکربن‌های سنگین و آب) و محصولات گازی ( $\text{CO}_2$ ،  $\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{CO}$  و غیره). مقادیر نسبی این محصولات به عوامل متعددی از جمله نرخ گرمادهی و دمای نهایی بستگی دارد (Basu, 2010). بر اساس نرخ گرمایش گرماکافت به طور گسترده به دو

نوع سریع و آهسته تقسیم‌بندی می‌شود. اگر زمان لازم برای گرم کردن سوخت تا درجه حرارت گرماکافت نسبت به زمان مشخصه برای واکنش گرماکافت طولانی‌تر باشد، این فرآیند آهسته به حساب می‌آید (Bennadji and M.Fisher, 2014). گرماکافت بستر ثابت گرمای مورد نیاز برای تجزیه حرارتی زیست‌توده از طریق یک منبع خارجی یا به‌وسیله‌ی احتراق محدود همانند کوره کندوبی شکل تامین می‌کند. ارزانی و قابلیت افزایش مقیاس و صنعتی کردن از مزایای این نوع گرماکافت است. آگاهی در مورد رفتار حرارتی نمونه‌های بزرگ زیست‌توده مولفه کلیدی برای بهینه‌سازی رفتار حرارتی زیست‌توده می‌باشد (Bridgwater, 2003). برای طراحی بهینه‌ی کوره-های عملیات حرارتی، آگاهی از مکانیزم‌ها و تحولاتی که در طول فرآیندهای تبدیل حرارتی اتفاق می‌افتد، ضروری است. با درک درست از فرآیند گرماکافت می‌توان زیست‌توده را به سوخت‌هایی ایده‌آل با بهبود خواص احتراقی تبدیل نمود و فرآیندهای حرارتی دیگر مانند گازی‌سازی و احتراق را بهبود بخشید (Bilbao et al., 1993).

ایجاد جو بی‌اثر برای انجام عملیات گرماکافت زیست‌توده صرفه‌ی اقتصادی نخواهد داشت. یک راه‌حل برای تامین انرژی مورد نیاز فرآیند گرماکافت، سوزاندن قسمتی از زیست‌توده به-وسیله‌ی وارد کردن مقدار کمی هوا به داخل کوره گرماکافت

\* نویسنده مسئول: a.piri@urmia.ac.ir

است. در اتمسفر اکسایشی گرمکافت در دماهای پایین‌تری شروع شده و تجزیه نسبت به جو بی‌اثر سریع‌تر است (Daouk et al., 2015). تحت شرایط اکسایشی، گرمکافت بستر ثابت منجر به سوختن بدون شعله و تشکیل یک جبهه احتراق پایدار در زیر سطح بستر می‌شود (Milhe et al., 2013). در تحقیقی مشاهده شد که با افزایش غلظت اکسیژن، بازده بیوجار کاهش و سرعت گرمکافت چوب افزایش می‌یابد (Su et al., 2012). همچنین اثبات شده است که در گرمکافت اکسایشی با افزایش غلظت اکسیژن سطح فعال بیوجار و گاز تولیدی از فرآیند گرمکافت افزایش یافته و بازده بیوجار و قیر کاهش می‌یابد (Zhao et al., 2014).

با توجه به لیفی بودن چوب، جهت‌گیری الیاف می‌تواند بر ترکیب مواد فرار خروجی در فرآیند گرمکافت چوب تاثیر داشته باشد (Bennadji & M. Fisher, 2014). اکثر تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه مطالعه و مدل‌سازی توزیع درجه حرارت قطعات چوب طی فرآیند گرمکافت در جو بی‌اثر بوده و توسط کوپل کردن مدل‌های سینتیکی پیشنهادی به مدل‌های انتقال حرارت انجام شده است (Bryden et al., 2002). محاسبه پارامترهای سینتیکی قابل اعتماد، به مدل‌های پیچیده نیاز دارد. این امر به علت ناهمگنی و پیچیدگی زیست‌توده است (Milhe et al., 2013). مدل‌سازی گرمکافت چوب به علت پیچیدگی فرآیندها و نیاز به اطلاعاتی از قبیل تعادل ترموشیمیایی، انتقال حرارت و جرم، مدل سینتیکی واکنش‌های شیمیایی و مدل چروکیدگی دشوار است و در زمینه گرمکافت اکسایشی قطعات بزرگ چوب، هیچ یک از موارد ذکر شده تا به حال تعیین نشده است. شبکه‌ی عصبی مصنوعی از روش‌های نوین مدل‌سازی در زمینه تبدیلات ترموشیمیایی می‌باشد. در صورتی که شبکه آموزش داده شده ساختار مناسبی را از کسر اتلاف جرمی ماده زیستی برحسب زمان از خود نشان دهد، می‌توان رفتار گرمکافتی قطعات چوب را در شرایط مختلف بدون انجام فعالیت‌های تحلیلی و آزمایش‌ها تجربی پرهزینه و وقت‌گیر پیش‌بینی کرد (Bidabadi & Keshavarzian, 2013). شبکه‌های عصبی مصنوعی زمانی مفید هستند که هدف اصلی پیش‌بینی نتیجه است و فعل و انفعالات مهم غیرخطی پیچیده در یک مجموعه داده وجود دارد، مانند گازی‌سازی زیست‌توده، زیرا شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی یادگیری و شناخت روابط بسیار غیر خطی را دارند (Pandey et al., 2015). از کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی تبدیلات ترموشیمیایی با استفاده از شبکه عصبی، می‌توان به مدل‌سازی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده در کوره بستر سیال (Puig-

اندک مطالعاتی در زمینه‌ی گرمکافت اکسایشی صورت گرفته و در کارهای انجام شده نسبتی از گازهای اکسیژن و نیتروژن مخلوط شده و تاثیر غلظت اکسیژن بر فرآیند گرمکافت بررسی گردیده است که این کار برای تبدیل ضایعات چوب از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نیست. در این تحقیق گرمکافت در حضور کامل اکسیژن و تاثیر دمای محیط گرمکافت بر تغییرات دما در سطح و مرکز، و کسر اتلاف جرمی نمونه‌های ضایعات چوب بررسی شد. همچنین جهت‌گیری الیاف در فرآیند گرمکافت اکسایشی بررسی گردید. توزیع درجه حرارت در مرکز مواد زیستی طی فرآیند گرمکافت پارامتری می‌باشد که با توجه به تاثیرش بر بازده محصولات می‌تواند مدل‌سازی گردد. با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی فرآیند گرمکافت اکسایشی و برای بهبود کنترل محصولات و پیش‌بینی محصولات حاصل از گرمکافت، استفاده از روش‌های مدل‌سازی نوین همچون شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار ترکیبات پیچیده و سنگین طی فرآیند گرمکافت مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

برای انجام تحقیق حاضر، از ضایعات هرس درخت چنار استفاده شد. علت انتخاب درخت چنار، فراوانی کشت آن در فضای سبز شهرهاست. نمونه‌های چوب در پاییز ۹۳ نمونه‌های چوب در ابعاد  $2/5 \times 2/5 \times 2/5$  سانتی‌متر آماده و به مدت ۵ ماه در دمای اتاق نگاه‌داری شدند. آماده‌سازی ابعاد ریزتر و گرمکافت ابعاد بزرگتر مستلزم انرژی بیشتری است. نمونه‌ها در داخل یک نگهدارنده‌ی توری قرار داده شد و به یک لودسل تیغه‌ای از جنس آلومینیوم با ظرفیت  $1/2$  کیلوگرم و خطای  $0/1$  (FS%) وصل گردید. جهت اندازه‌گیری دما در سطح و مرکز نمونه‌ها از دو ترموکوپل نوع K به قطر  $1/8$  میلی‌متر و با ظرفیت  $1200$  درجه‌ی سیلسیوس استفاده شد. از آنجایی که بازه‌ی دمایی فرآیند گرمکافت بین  $350$  تا  $600$  درجه سیلسیوس می‌باشد (Sharma et al., 2015) و دماهای پایین‌تر انرژی کمتری مصرف می‌کنند، دو دمای  $300$  و  $400$  درجه سیلسیوس در این آزمایش استفاده شدند. نمونه داخل کوره‌ای محتوی هوا با قابلیت کنترل دما، ارتفاع فضای داخلی  $500$  میلی‌متر و قطر  $400$  میلی‌متر قرار داده شد. کوره از دمای  $23$  درجه سیلسیوس با نرخ  $0/57$  درجه بر ثانیه تا دمای  $300$  درجه سیلسیوس گرم

## نتایج و بحث

### تغییرات دما در سطح و مرکز نمونه‌ها در فرآیند گرماکافت اکسایشی آهسته

شکل ۲ نمودار تغییرات دما در سطح و مرکز نمونه‌های مکعب ۲/۵ سانتی‌متری برای دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. با افزایش دما از ۳۰۰ به ۴۰۰ درجه سلسیوس سرعت انجام واکنش‌ها افزایش یافته و شیب افزایش دما در ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به ۳۰۰ درجه سلسیوس بیشتر می‌باشد. دمای نهایی مرکز نمونه در آزمایش ۳۰۰ درجه سلسیوس، ۵۶۰ درجه سلسیوس و در آزمایش ۴۰۰ درجه سلسیوس، ۶۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد که این اختلاف‌ها به علت واکنش‌های ثانویه می‌باشد که در قطعات بزرگ چوب به علت طولانی بودن اقامت قیر در چوب رخ می‌دهد و طی آن قیر در فرآیندی گرماده به بیوجار و گاز تبدیل می‌شود (Di Blasi et al, 2001). در هر یک از دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه، دمای سطح نمونه‌ها به صورت خطی افزایش یافته و بعد از مدتی شاهد افزایش ناگهانی دما در سطح نمونه خواهیم بود که نشان‌گر وقوع پدیده‌ی احتراق می‌باشد. بعد از پدیده‌ی احتراق دما در سطح نمونه به مقدار ثابتی می‌رسد. این مقدار ثابت برای ۳۰۰ درجه سلسیوس کوره، در حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس بوده و برای دمای ۴۰۰ درجه کوره، در حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. علت بیشتر بودن دمای سطح نمونه از دمای کوره، وقوع اکسیداسیون در سطح چوب می‌باشد که فرآیندی گرماده است.



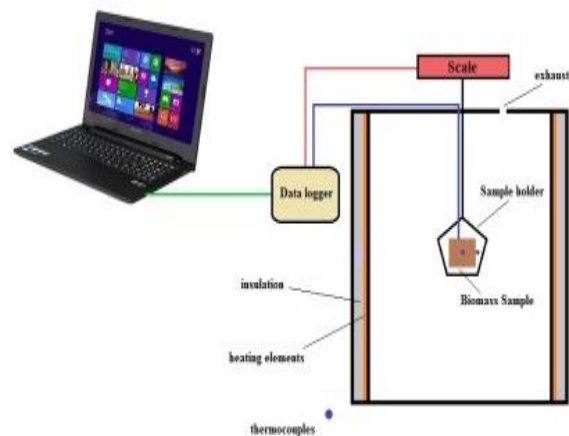
شکل ۲- نمودارهای تغییرات دما در سطح و مرکز نمونه‌های مکعب ۲/۵ سانتی‌متری

### کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها در فرآیند گرماکافت اکسایشی آهسته

شکل ۴، کسر اتلاف جرم نمونه‌های مکعبی ۲/۵ سانتی‌متری برای دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد.

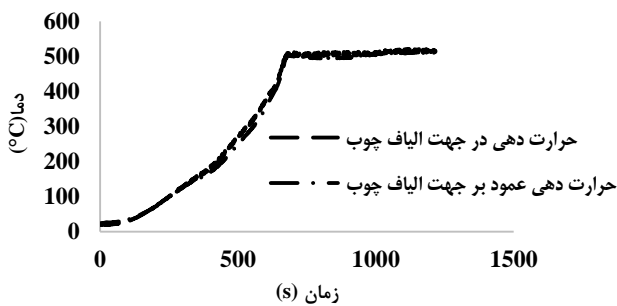
شد و در طی ۱۲۰۰ ثانیه دو پارامتر جرم و دما به ترتیب به وسیله لودسل و ترموکوپل اندازه‌گیری شده و توسط یک سیستم جمع‌آوری داده با نرخ یک نمونه بر ثانیه ثبت گردید. شماتیک سیستم اندازه‌گیری و ثبت، وزن و دما در شکل ۱ مشاهده می‌شود. این فرآیند برای دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس نیز به همین صورت و در چهار تکرار انجام شد و از میانگین تکرارها برای رسم نمودار استفاده گردید. همچنین به منظور بررسی تاثیر جهت الیاف، این آزمایش برای ۳۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. برای بررسی یک بعدی توزیع حرارت، ارتفاع قطعات چهار برابر طول و عرض در نظر گرفته شد (Grieco and Baldi, 2011) و نمونه‌های چوب در ابعاد ۸×۲×۲ سانتی‌متر و در دو جهت موازی و عمود بر الیاف درخت گرماکافت شدند. به منظور کسب اطلاعات دقیق از سینتیک واکنش و انتقال جرم، کسر اتلاف جرمی در هر لحظه از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{کسر اتلاف جرمی} = \frac{m(g)}{m_0(g)} \times 100$$

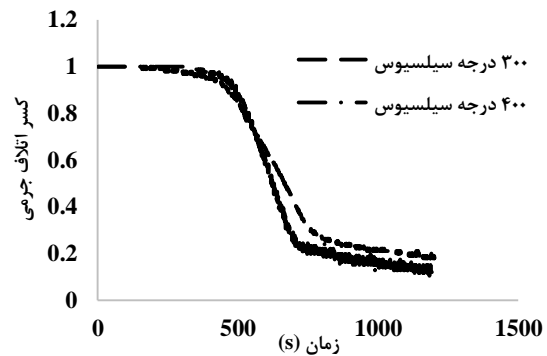


شکل ۱- سیستم اندازه‌گیری و ثبت دما و وزن نمونه‌های چوب طی فرآیند گرماکافت اکسایشی

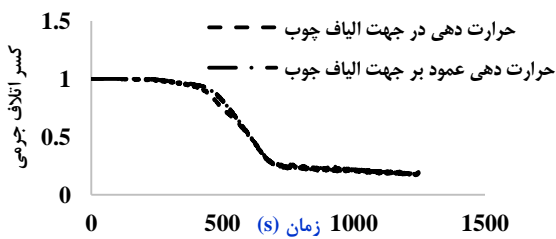
که  $m$  وزن نمونه در هر لحظه از فرآیند گرماکافت و  $m_0$  وزن اولیه نمونه بر حسب گرم است. با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی فرآیند گرماکافت اکسایشی، شبکه‌های عصبی مصنوعی راهکار هوشمندی برای پیش‌بینی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی ضایعات چوب به شمار می‌روند. از آنجایی که اکثریت مسائل مدلینگ در شبکه‌های عصبی با یک لایه مخفی نرونی قابل حل می‌باشند، بنابراین برای توسعه مدل از یک لایه مخفی استفاده شد. داده‌های هر شرایط از فرآیند گرماکافت به دو دسته کلی تقسیم شدند، ۵۰٪ داده‌ها برای آموزش شبکه و ۵۰٪ جهت تست شبکه استفاده شد. جهت مقایسه ساختارهای مختلف از سه مقیاس ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و متوسط درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد که مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند.



شکل ۴- تاثیر جهت‌گیری الیاف چوب بر تغییرات دما در مرکز نمونه‌ها



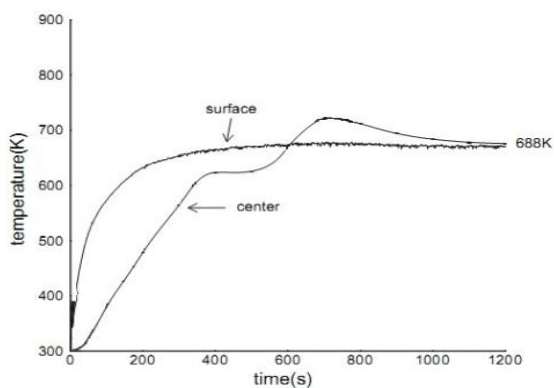
شکل ۳- کسر اتلاف جرمی نمونه‌های مکعب ۲/۵ سانتی‌متری در دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه‌ی سیلسیوس



شکل ۵- تاثیر جهت‌گیری الیاف چوب بر کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها

### مقایسه فرآیند گرماکافت در جو بی‌اثر و گرماکافت اکسایشی (تحقیق حاضر)

Park et al (2010) گرماکافت نمونه‌های کروی چوب را به قطر یک اینچ، با گرمادهی سریع در دماهای مختلف و در حضور گاز آرگون به عنوان گاز بی‌اثر بررسی کردند. نمودار مربوط به تغییرات دما در سطح نمونه‌ها در این آزمایش در شکل ۶ قابل مشاهده است. مطابق شکل بعد از گذشت مدتی، دمای سطح نمونه‌ها با دمای کوره برابر خواهد شد. در حالی که در تحقیق حاضر (گرماکافت اکسایشی)، دمای سطح نمونه‌ها در حدود ۱۰۰ درجه سیلسوس بیشتر از دمای کوره بود. پس فرآیند گرماکافت اکسایشی در دمایی بالاتر از دمای کوره انجام می‌شود که می‌توان از این ویژگی جهت کاهش مصرف انرژی برای فرآیند گرماکافت استفاده کرد.



شکل ۶- تغییرات دما در سطح و مرکز نمونه‌های چوب طی فرآیند گرماکافت در جو بی‌اثر (Park et al, 2010)

با توجه به قسمت اول نمودار (تا ثانیه ۴۰۰) مربوط به آب‌زدایی نمونه خواهد بود. بعد از آن با افزایش دما فرآیند گرماکافت در حضور اکسیژن شروع می‌شود. در مرحله آخر شیب نمودار به شدت کاهش یافته و اکسیژن موجود در داخل کوره با بیوچار واکنش نشان داده و تولید CO و CO<sub>2</sub> می‌کند که این واکنش سبب کاهش بازده بیوچار خواهد شد. شیب نمودار کسر اتلاف جرمی در دمای ۴۰۰ درجه سیلسیوس، در قسمت دوم، از شیب نمودار ۳۰۰ درجه سیلسیوس، بیشتر می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش سرعت گرماکافت با افزایش دما می‌باشد. قسمت آخر نمودار به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش دما، بازده نهایی بیوچار کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به نمودار، در فرآیندهای مربوط به استخراج نفت زیستی و گازهای اشتعال‌پذیر از مواد فرار حاصل از گرماکافت، بعد از مدت زمان معینی مقدار این مواد فرار به شدت کاهش می‌یابد که فرآیند باید متوقف شود.

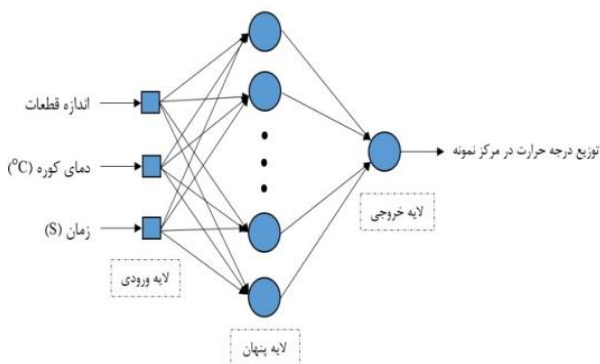
### تاثیر جهت‌گیری الیاف چوب بر توزیع دما و کسر اتلاف جرمی طی فرآیند گرماکافت اکسایشی

شکل ۴ نمودار تغییرات دما در مرکز و شکل ۵ نمودار کسر اتلاف جرمی نمونه‌های چوب با جهت‌گیری متفاوت الیاف را نشان می‌دهد. نمودار تغییرات دما و کسر اتلاف جرمی در نمونه‌های موازی با الیاف چوب، با نمونه‌های عمود بر الیاف چوب تفاوتی ندارند. گرماکافت چوب فرآیندی پیچیده است که شامل بسیاری از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مانند انتقال حرارت، تبخیر رطوبت، سینتیک تجزیه، گرمای گرماکافت، فشار ایجاد شده در جسم جامد، تغییرات در خواص مواد با پیشرفت واکنش و افزایش دما و غیره می‌شود. به نظر می‌رسد پیچیدگی فرآیند گرماکافت، سریع بودن واکنش‌ها در فرآیند گرماکافت اکسایشی و تغییرات در خواص با گسترش فرآیند گرماکافت، تاثیر جهت‌گیری الیاف چوب در این فرآیند را کم رنگ کرده است.

متفاوتی را از خود نشان خواهند داد. در شکل ۶ نمودار تغییرات دما در مرکز چوب، طی فرآیند گرماکافت سریع را در دمای ۴۱۵ درجه سلسیوس (۶۸۸ درجه‌ی کلونین) مشاهده می‌گردد. به علت همپوشانی در واکنش‌های گرماگیر و گرماده پیک دمایی کوچک‌تری در مرکز مشاهده می‌شود. (تحقیق حاضر) فرآیند گرماکافت آهسته در جو اکسایشی را نشان می‌دهد که به علت آهسته بودن گرماده‌ی، پیک دمایی مدت زمان بیشتری طول خواهد کشید. مدت اقامت در دمای بیشینه بر ترکیب و بازده نهایی محصولات فرآیند گرماکافت اثرگذار است. (Veksha et al., 2014).

#### نتایج حاصل از مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

از سه فاکتور زمان، اندازه‌ی قطعات و دمای کوره به عنوان متغیرهای ورودی جهت آموزش شبکه عصبی و توسعه مدل پیش‌بینی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها استفاده گردید. در شکل ۸ ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده برای توسعه مدل نشان داده شده است. در این شبکه از الگوریتم پیش فرض مارکورات-لونبرگ به عنوان الگوریتم آموزش، تابع تانژانت هیپربولیک به عنوان تابع انتقال در لایه مخفی و تابع خطی به عنوان تابع انتقال در لایه خروجی استفاده گردید. تعداد اپوک برابر با ۱۰۰۰ قرار داده شد. برای پیدا کردن بهترین مدل پیش‌بینی، تعداد نرون‌های لایه‌ی مخفی از ۱ تا ۲۰ تغییر داده شد، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای نرون‌های مختلف به دست آمد و تعداد نرون‌های مربوط به کمترین مقدار RMSE به عنوان مناسب‌ترین ساختار جهت پیش‌بینی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی نمونه‌های چوب طی فرآیند گرماکافت اکسایشی تشخیص داده شد.

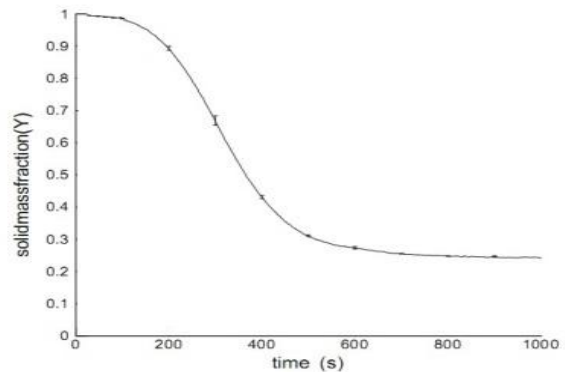


شکل ۸- ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده برای مدل‌سازی توزیع درجه حرارت در مرکز نمونه

جدول ۱ مشخصات بهترین ساختار شبکه‌ی عصبی به دست آمده برای مدل‌سازی توزیع دما و کسر اتلاف جرم نمونه‌های چوب طی فرآیند گرماکافت اکسایشی را نشان می‌دهد.

#### مقایسه بازده نهایی در فرآیند گرماکافت اکسایشی با گرماکافت در جو بی‌اثر

نمودار مربوط به کسر اتلاف جرمی تحقیق (Park et al (2010) در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷- کسر اتلاف جرمی گرماکافت چوب در جو بی‌اثر (Park et al, 2010)

بازده بیوچار با افزایش اندازه‌ی زیست‌توده، با گرماده‌ی آهسته و با کاهش دمای محیط گرماکافت، افزایش پیدا می‌کند (Basu, 2010). گرماده‌ی در آزمایش (Park et al (2010) به صورت سریع بوده در حالی که گرماده‌ی در تحقیق حاضر به صورت آهسته می‌باشد، حجم نمونه نصف حجم چوب در تحقیق حاضر بوده و دمای گرماکافت ۱۵ درجه از دمای تحقیق حاضر بیشتر است. اما با این حال بازده نهایی بیوچار در تحقیق (Park et al (2010) نزدیک به ۳۰ درصد است در حالی که در تحقیق حاضر کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد (شکل ۳). سریع بودن واکنش‌ها و وقوع پدیده‌ی احتراق و اکسیداسیون باعث کاهش بازده نهایی بیوچار و افزایش مواد فرار طی فرآیند گرماکافت اکسایشی خواهد شد. با توجه به رفتار نمونه طی فرآیند گرماکافت اکسایشی، می‌توان درصد محصولات فرآیند گرماکافت را کنترل کرد و در تحقیقات مربوط به تولید بیوچار با کم کردن مدت زمان اقامت زیست‌توده در کوره، حداکثر بازده بیوچار را بدست آورد.

#### مقایسه فرآیند گرماکافت سریع با گرماکافت آهسته

در حرارت‌دهی آهسته (تحقیق حاضر)، به علت آهسته بودن نرخ حرارت‌دهی و برابر بودن دمای اولیه کوره، تا نقطه‌ی مشخصی تغییرات درجه حرارت در سطح و مرکز (شکل ۲) و کسر اتلاف جرمی (شکل ۳) نمونه‌ها برابر خواهد بود و بعد از آن به علت تفاوت در دمای کوره و دمای سطح نمونه‌ها، نمودار تغییرات درجه حرارت و کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها تفاوت خواهد کرد. در فرآیند گرماکافت سریع (Park et al, 2010) با تغییر دمای کوره‌ی گرماکافت، تغییرات دما (شکل ۶) و کسر اتلاف جرمی (شکل ۷) به علت تفاوت در سرعت واکنش‌ها، نمودارهای

جدول ۱- مشخصات بهترین ساختار شبکه‌ی عصبی بدست آمده برای مدل‌سازی توزیع دما و کسر اتلاف جرم نمونه‌ها

| تعداد نرون‌های لایه‌ی مخفی | ضریب همبستگی ( $R^2$ ) | ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) | متوسط درصد خطای مطلق (MAPE) | فرآیند            |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| ۲۰                         | ۰/۹۹۹۱                 | ۰/۰۱۱۲                         | ۰/۰۵۴                       | کسر اتلاف جرم     |
| ۱۹                         | ۰/۹۹۹۸                 | ۰/۵۷۳                          | ۰/۰۰۸۶                      | توزیع دما در مرکز |

### نتیجه‌گیری کلی

در مطالعات مربوط به گرماکافت ضایعات چوب، ایجاد جو بی‌اثر و مصرف انرژی برای گرماکافت زیست‌توده، صرفه اقتصادی نخواهد داشت. در این مواقع استفاده از بخشی از انرژی خود زیست‌توده برای تامین انرژی مورد نیاز برای فرآیند گرماکافت، راه حل مناسبی به نظر می‌رسد. در گرماکافت اکسایشی، دمای سطح نمونه‌ها در حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس بیشتر از گرماکافت در جو بی‌اثر بود. گرماکافت اکسایشی باعث کاهش بازده نهایی بیوچار و افزایش سرعت واکنش گردید. با افزایش دما سرعت انجام واکنش گرماکافت افزایش و بازده نهایی بیوچار کاهش پیدا کرد. همچنین جهت‌گیری الیاف تاثیری بر توزیع دما و کسر اتلاف جرمی نمونه‌ها نداشت. مدت زمان پیک دما در گرماکافت آهسته نسبت به گرماکافت سریع بیشتر است که این

امر می‌تواند بر بازده و ترکیب محصولات اثرگذار باشد. با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی فرآیند گرماکافت، شبکه‌های عصبی مصنوعی راهکار هوشمندی برای پیش‌بینی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی چوب به شمار می‌روند. نتایج حاصل از مدل‌سازی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی، تطابق خوبی با نتایج حاصل از مطالعات تجربی داشت. برای توسعه مدل پیش‌بینی توزیع دما و کسر اتلاف جرمی از یک لایه مخفی استفاده شد. بهترین ساختار برای مدل‌سازی توزیع دما با ۱۹ نرون در لایه مخفی، ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۸ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۵۷۳ و برای کسر اتلاف جرمی با ۲۰ نرون در لایه مخفی، ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۱ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۱۲ بدست آمد. پس می‌توان از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی فرآیند گرماکافت اکسایشی ضایعات چوب استفاده کرد و از نتایج تحقیق حاضر می‌توان برای کنترل و پیش‌بینی فرآیند در کاربردهای صنعتی استفاده نمود. به استناد آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، می‌توان گرماکافت اکسایشی را به دلیل دمای شروع کم و دمای کاری بالا، راه حل مناسبی برای کاهش مصرف انرژی در گرماکافت ضایعات چوب معرفی نمود.

### REFERENCES

- Basu, P. (2010) Biomass Gasification and Pyrolysis. Elsevier.
- Bennadji, H. and M. Fisher, E. (2014). Influence of the Grain Direction on the Low-Temperature Pyrolysis of Large Wood Particles. Chemical Engineering Transactions, 37.
- Bidabadi, M and Keshavarzian, M. (2013) Pyrolysis of organic materials in combustion processes. Tehran: University of Science and Technology. (In Farsi)
- Bilbao, R., Millera, A. and Murillo, M. B. (1993). Temperature profiles and weight loss in the thermal decomposition of large spherical wood particles. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1811-1817
- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal, 91, 87-102.
- Bryden, K. M., Ragland, K. W. and Rutland, C. J. (2002). Modeling thermally thick pyrolysis of wood. Biomass Bioenergy, 22, 41-53.
- Conesa, J. A., Caballero, J. A. and Reyes-Labarta, J. A. (2004). Artificial neural network for modelling thermal decompositions. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71, 343-352.
- Daouk, E., Steene, L., Paviet F and Salvador, S. (2015). Thick wood particle pyrolysis in an oxidative atmosphere. Chemical Engineering Science, 126, 608-615.
- Demirbas, A, Arin G (2002). An overview of biomass pyrolysis. Energy Sources, 24(5), 471-482.
- Di Blasi, C., Branca, C., Santoro, A. and Hernandez, E. G. (2001). Pyrolytic behavior and products of some wood varieties, Combustion and Flame, 124, 165-177.
- Grieco E. and Baldi, G. (2011). Analysis and modeling of wood pyrolysis. Chemical Engineering Science, 66, 650-660.
- Mikulandric, R., Loncar, D., Böhning, D., Böhme, R. and Beckmann, M. (2014). Artificial neural network modelling approach for a biomass gasification process in fixed bed gasifiers. Energy Conversion and Management, 87, 1210-1223.
- Milhe M., Steene, L., Haube, M., Commandre, J. M., Fassinou, W. F. and Flamant, G. J. (2013). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 103, 102-111.
- Pandey, A., Bhaskar, T., Stocker, M. & Sukumaran, R. (2015) Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. Amsterdam: Elsevier.
- Park W. C., Atreya, A. and Baum, H. R. (2010). Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. Combustion and Flame, 157, 481-494.
- Puig-Arnavat, M., Hernandez, A., Bruno, J. C. and Coronas, A. (2013). Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers. Biomass and bioenergy, 49, 279- 289.

- Sharma, A., Pareek, V. and Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081-1096.
- Su, Y., Luo, Y., Wu, W., Zhang, Y. and Zhao, S. (2012). Characteristics of pine wood oxidative pyrolysis: Degradation behavior, carbon oxide production and heat properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 98, 137-143.
- Veksha, A., McLaughlin, H., B. Layzell., D. and M. Hill, J (2014). Pyrolysis of wood to biochar: Increasing yield while maintaining microporosity. *Bioresource Technology*, 153, 173–179
- Zhao, S., Luo, Y., Su, Y., Zhang, Y. and Long, Y. (2014). Experimental Investigation of the Oxidative Pyrolysis Mechanism of Pinewood on Fixed-Bed Reactor. *Energy and fuels*, 28, 5049–5056.