

## بررسی پدیده خود گرمایی در توده‌های انباشته از مواد و فرآورده‌های چوبی

امیرهومن حمصی\*

### چکیده

در این مطالعه، چگونگی بروز پدیده خودگرمایی در مواد اولیه و برخی از فرآورده‌های مرکب چوبی مورد بررسی قرار گرفت. مصرف اکسیژن در داخل مواد چوبی، به پیدایش گرادیان غلظت و در نتیجه انتشار آن از خارج به درون مواد چوبی منجر می‌گردد. با آنکه فرآیند انتشار کند است، طی دوره طولانی خودگرمایی، مقدار اکسیژن انتشار یافته فزونی گرفته و حرارت آزاد شده در نتیجه واکنش با اکسیژن قابل توجه خواهد بود. حرارت تولید شده منجر به ایجاد گرادیان حرارتی گردیده که در نتیجه آن، حرارت از طریق پدیده هدایت و انتشار بخار آب (در ماده مرطوب)، به محیط اطراف منتقل می‌شود. هنگامی که پتانسیل حرارتی "اکسیژن انتشار یافته"، از اتلاف حرارت بیشتر گردد، پدیده خودگرمایی رخ می‌دهد. در نتیجه پدیده خودگرمایی، ماده چوبی به دمای ثابتی می‌رسد که در آن، گرمای تولید شده معادل حرارت تلف شده است. به منظور تعیین این دمای تعادل، سه نوع شار حرارتی ناشی از انتشار اکسیژن، پدیده هدایت و انتشار بخار آب، ارزیابی شد و برای دماهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین نتایج مشاهدات تجربی حاکی از آن است که در توده‌های انباشته از خرده چوب و خاک اره در هوای آزاد، با توجه به شرایط محیطی و ابعاد توده، درجه حرارت حداکثر تا حدود ۶۵ درجه سانتیگراد یا کمی بیشتر افزایش خواهد یافت.

**واژه‌های کلیدی:** انتشار اکسیژن، هدایت حرارتی، انتشار بخار، خودگرمایی، خاک اره، خرده چوب.

---

\*استادیار گروه مهندسی صنایع چوب و کاغذ، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی (تهران)

## مقدمه

پدیده خود گرمایی، از طرق مختلف موجب متلاشی شدن و افت ارزش فرآورده‌های جنگلی می‌شود. در توده‌های انباشته خرده چوب، خاک اره، پوست، اوراق تخته فیبر که به طور گرم دسته‌بندی شده‌اند، تخته فیبر سخت طی فرآیند متعادل‌سازی و در سازه‌های مجاور ادوات حرارتی، پدیده خود گرمایی رخ می‌دهد. در برخی از فرآیندهای منجر به خود گرمایی از قبیل متابولیسم باکتری‌های بی‌هوازی، هیرولیز و پیرولیز، اکسیژن دخالتی ندارد (۹). فرآیندهای تخمیر و پوسیدگی میکروبی در خرده چوب‌های انباشته قادر به افزایش درجه حرارت توده است.

پژوهشگری به نام Anon ضمن بررسی دامنه وسیعی از عوامل موثر بر نرخ افزایش دمای توده‌های انباشته، نتیجه گرفت که دمای توده ممکن است پس از فقط دو هفته به حدود ۶۶ درجه سانتیگراد برسد (۲). این عوامل عبارتند از ارتفاع توده، نسبت سطح به حجم توده، اتلاف حرارت از طریق پدیده‌های همرفتی و تشعشع، مدت زمان انباشتگی (از لحاظ سن خرده چوب‌ها و مقدار فشردگی)، جریان هوا، وجود ناخالصی‌هایی از قبیل پوست، چوب پوسیده و خاک اره.

از طرفی، برخی میکروارگانیسم‌های مصرف کننده اکسیژن می‌توانند دمای چوب را به مقدار مورد نیاز برای فرآیند هیدرولیز برسانند. فرآیندهایی از قبیل تنفس سلول‌های زنده چوب، متابولیسم قارچ‌های ساکن در چوب و البته اکسیداسیون مستقیم چوب، کاملاً به وجود اکسیژن متکی می‌باشند. در مرحله نهایی خود گرمایی، بدون حضور اکسیژن، گرم شدن خود به خود چوب میسر نیست.

در خصوص روش‌های مطلوب ذخیره‌سازی مواد اولیه لیگنو سلولزی مورد استفاده در صنایع تبدیل مکانیکی و شیمیایی، طی سال‌های گذشته مطالعات متعددی انجام شده است. طبق مطالعه آزمایشگاه فرآورده‌های جنگلی در سال ۱۹۳۲، دمای داخل توده‌های انباشته از خرده چوب‌ها حدود ۷۰ درجه سانتیگراد گزارش شده است (۱). با گذشت سالیان متمادی از شروع انجام چنین مطالعاتی، با توجه به تاثیر عوامل متعدد دخیل، مباحث زیادی در این خصوص مطرح است. در واقع تاکنون عواملی از قبیل ابعاد توده، شرایط جوی منطقه، نوع و ترکیب مواد انباشته (پهن برگ، سوزنی برگ، باگاس و غیره)، رطوبت اولیه، چگونگی توزیع مواد، وجود ذرات ریز و ناخالصی‌ها، روش انباشتن مواد از نظر مقدار فشردگی حاصله، محوطه ذخیره‌سازی از لحاظ پوشیدگی یا باز بودن و غیره شناسایی گردیده‌اند.

آگاهی از مقدار نفوذ گاز در فرآورده‌های جنگلی، به کنترل فرآیند خود گرمایی کمک می‌کند. قبل از وقوع پدیده خود گرمایی، مقداری اکسیژن حفره سلول‌ها و فضاهای بین قطعات چوب را پر می‌کند. Kubler حرارت نسبتاً کمی را که این "اکسیژن مقیم"<sup>۱</sup> تولید می‌کند، محاسبه نمود (۱۱). در نتیجه اثر دودکشی ایجاد شده در توده‌های گرم، اکسیژن از طریق جریان هوا به توده‌های نفوذپذیر خرده چوب و خاک اره منتقل می‌شود (۱۰). عامل دیگر نفوذ گاز، انتشار مولکولی است که در این مطالعه بررسی شده است.

مصرف (سوختن) اکسیژن در داخل مواد چوبی، به پیدایش گرادیان غلظت و در نتیجه انتشار آن از خارج به درون مواد چوبی منجر می‌گردد. با آنکه فرآیند انتشار کند است، طی دوره طولانی خود گرمایی، مقدار اکسیژن انتشار یافته فزونی گرفته و حرارت آزاد شده بر اثر واکنش با اکسیژن زیاد خواهد بود.

حرارت اشتعال، برای چوب با فرمول تجربی  $C_{42}H_{60}O_{28}$ ، بین ۲۰ تا  $14,726 \text{ KJ/g}$  در ازای هر گرم

اکسیژن مصرفی گزارش شده است (۵ و ۶). حرارت تولید شده به ایجاد گرادیان حرارتی منجر گردیده که در نتیجه آن، حرارت از طریق پدیده هدایت و انتشار بخار آب (در ماده مرطوب)، به محیط اطراف منتقل می شود. پدیده انتشار در فرآیند اشتعال چوب نقشی ایفا نمی کند، زیرا سطوح زغال چوب با تمامی اکسیژن مجاور خود واکنش کرده و در نتیجه امکان انتشار اکسیژن به درون چوب میسر نیست. در چنین شرایطی، حتی چنانچه غلظت اکسیژن در سطوح ماده مشتعل بیش از درون آن باشد، بواسطه جریان شدید رو به خارج گازهای ناشی از تجزیه حرارتی، اکسیژن به سختی می تواند به داخل چوب نفوذ کند. به علاوه، در هنگام اشتعال، زمان کافی برای انتشار قابل توجه اکسیژن وجود ندارد. هدف این تحقیق، بررسی نقش انتشار اکسیژن، بخار آب و هدایت حرارتی بر پدیده خود گرمایی توده های انباشته از مواد اولیه و برخی از اوراق مرکب چوبی است.

### مواد و روش ها

در نتیجه پدیده خود گرمایی، ماده چوبی به دمای ثابتی می رسد که در آن دما، حرارت تولید شده معادل حرارت منتقل شده است. به منظور برآورد تقریبی این دمای تعادل، سه نوع شار حرارتی ناشی از انتشار اکسیژن، بخار آب و هدایت، ارزیابی و برای دماهای مختلف، مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین به منظور تعیین حداکثر دمای واقعی توده های انباشته از خرده چوب و خاک اره، ضمن نمونه برداری تصادفی از کارخانه های مختلف تبدیل مکانیکی و شیمیایی در مقاطع زمانی مختلف، نتایج حاصل از مشاهدات تجربی سایر محققین مورد استناد قرار گرفت.

### پدیده انتشار اکسیژن

با توجه به قانون اول Fick، جابه جایی اکسیژن (mo) در جهت x (cm)، عمود بر سطح چوب در حالت همدمای، از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$m_0 = -D_{oe} \Delta c_0 / \Delta x \quad g / cm^2 s \quad (1)$$

با فرض آنکه غلظت اکسیژن (Co)، در موضع مصرف آن صفر باشد، مقدار دیفرانسیل ایجاد شده ( $\Delta c_0$ )، با غلظت اکسیژن در هوای مجاور چوب، یعنی  $0.00028 \text{ g/cm}^3$  (در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد)، برابر خواهد بود. مقدار انتشار موثر اکسیژن ( $D_{oe}$ )، تابعی از درجه حرارت T (بر حسب کلوین) بوده و با ضریب انتشار حجمی (ضریب انتشار نرمال مولکولی) اکسیژن در هوا ( $D_0$ )، در ارتباط می باشد (۴):

$$D_0 = 0.178 (T/273)^{1.75} \text{ cm}^2/s$$

در توده های انباشته خرده چوب مورد استفاده در تولید خمیر کاغذ و خاک اره و همچنین تخته فیبر عایقی، نفوذ اکسیژن در حفرات بین خرده چوب ها یا قطعات، بیش از درون آن هاست. بنابراین  $D_{oe}$ ، از فاکتور جزء حفره ای<sup>۲</sup> (نسبت حجم حفرات به حجم قطعات متخلخل چوب بر حسب  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )، تبعیت می کند. دیگر عامل دخیل در  $D_{oe}$ ، نسبت طول مسیری است که باید به وسیله مولکول ها در انتشار بین دو نقطه در جهت X پیموده شود و به صورت  $\tau$  نشان داده می شود (۳). بنابراین انتشار موثر را می توان به

$$D_{oe} = D_0 V / \tau \quad \text{صورت زیر نوشت:}$$

فاکتور  $\tau$ ، تابعی از جزء حفره‌ای ( $V$ ) بوده و داریم:

$$V=1 \rightarrow \tau=1 \quad \text{و} \quad V=0 \rightarrow \tau=\infty$$

نمایش ریاضی چنین رابطه‌ای به صورت  $\tau=1/V$  است. از آنجا که طول مسیر با حجم قطعات در ارتباط است، می‌توان از توان سوم  $V$  برای محاسبه  $\tau$  استفاده نمود، یعنی خواهیم داشت:

$$T=1/V^3 \rightarrow Doe=DoV^4$$

با در نظر گرفتن  $V=0/67$  برای خاک اره (اندیس S) و  $V=0/63$  برای خرده چوب (اندیس C)، خواهیم داشت (۱۰):

$$Doe_s=(0/67)^4 Do=0/2015Do \quad \text{و} \quad Doe_c=(0/63)^4 Do=0/1575Do$$

در نگاه اول، بعید به نظر می‌رسد که توده نسبتاً حجیم از خرده چوب در مقایسه با خاک اره، نفوذپذیری کمتری داشته باشد. یادآور می‌شود در این مطالعه، نقش پدیده انتشار مورد توجه است که سرعت آن در مقایسه با پدیده همرفتی سریعاً کاهش می‌یابد. علت این امر، گرانشی لایه‌های سطحی دیواره‌های مجاری باریک موجود در توده مواد است. در واقع عرض مجرا نیز بر پدیده انتشار موثر است. بنابر آنچه که ذکر شد، یکسان فرض نمودن ضریب انتشار موثر برای خاک اره و خرده چوب به صورت:

$$Doe=0/16Do$$

منطقی به نظر می‌رسد. بدین ترتیب مقدار جابه‌جایی اکسیژن در توده مواد با در نظر گرفتن حفرات مابین آن‌ها از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$m_0 = -0.16 \times 0.178(T/273)^{1.75} \times 0.00028 / \Delta x \quad g/cm^2s \quad (2)$$

$$= -80 \times 10^{-7} (T/273)^{1.75} / \Delta x$$

با در نظر گرفتن میزان حرارت تولید شده توسط اکسیژن به مقدار ۱۴۷۲۶ ژول در ازای هر گرم، شار حرارتی عبارت خواهد بود از:

$$Q_0 = -6 \times 10^{-6} T^{1.75} / \Delta x \quad J/cm^2s \quad (3)$$

در تخته فیبرهای عایقی سبک با دانسیته ۱۰ پوند بر فوت مکعب (۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب) که از خرده چوب‌هایی با جرم ویژه ۰/۵ تولید شده‌اند، جزء حجم الیاف عبارت است از:

$$10 / (0/5 \times 62/4) = 0/32$$

و به این ترتیب جزء حفره‌ای برابر است با:

$$V = 1 - 0/32 = 0/68$$

این مقدار برای خرده چوب می‌تواند بیشتر باشد. لازم به ذکر است جهت گیری الیاف در صفحه اوراق فشرده به کاهش جزئی انتشار منجر می‌شود، به گونه‌ای که معادله (۲)، قابل استفاده خواهد بود. چنانچه تخته فیبر سخت سبک با دانسیته مرزی ۳۱ پوند بر فوت مکعب (حدود

۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، که مابین تخته فیبر عایقی و تخته فیبر سخت طبقه بندی می شود، از خرده چوب هایی با جرم ویژه ۰/۵ تولید شود، فاقد حفرات مابین الیاف خواهد بود. در این نوع از تخته، همانند جهت عمود بر الیاف چوب ماسیو، انتشار گازها از طریق حفرات سلول های مجاور و از میان دیواره سلولی انجام خواهد شد.

با توجه به عدم دسترسی به داده های تجربی در خصوص انتشار اکسیژن در دیوارهای سلولی، فرض می شود همانگونه که دیواره های سلولی خشک از عبور بخار آب ممانعت می کنند، این دیواره ها قادر به مسدود کردن عبور اکسیژن نیز می باشند. بنابراین دیواره های سلولی در چوب ماسیو، انتشار موثر عمود بر جهت الیاف را با ضریب ۰/۰۱ کاهش می دهند (۸) و خواهیم داشت:

$$m_{owt} = -0.178(T/273)^{1.75} \times 0.01 \times 0.00028 / \Delta x \quad g/cm^2 s \quad (۴)$$

$$Q_{owt} = -4 \times 10^{-6} T^{1.75} / \Delta x \quad J/cm^2 s \quad (۵)$$

البته در جهت موازی با الیاف، جابه جایی اکسیژن ( $m_{owf}$ ) و شار حرارتی ( $Q_{owf}$ ) در حدود ۸ الی ۱۰ برابر بیشتر است:

$$Q_{owf} = -4 \times 10^{-6} T^{1.75} / \Delta x \quad J/cm^2 s \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن  $\Delta x = 1$ ، مقدار شار حرارتی محاسبه و در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است. این به مفهوم مصرف اکسیژن در ۱ سانتیمتری زیر سطح است. برای محاسبه شار حرارتی حاصل از مصرف اکسیژن در  $n$  سانتیمتری زیر سطح، باید مقادیر ارائه شده را بر  $n$  تقسیم کرد.

### انتقال حرارت

پدیده انتقال حرارت در فرآورده های جنگلی به دو علت پیچیده است. اول آنکه تمامی قسمت های توده، و نه تنها مرکز آن ها، حرارت تولید می کند. بنابراین، گرادیان درجه حرارت  $(C/cm)$   $\partial t / \partial x$  تولید شده به وسیله حرارت  $Q_0$  به سمت سطح افزایش می یابد. علت دوم این است که با افزایش فاصله از مرکز توده، مقدار مواد به خصوص در توده های مخروطی شکل، افزایش می یابد. بنابراین برای انتقال مقدار مشخصی حرارت، لازم است گرادیان دما  $\partial t / \partial x$  به سمت سطح کاهش یابد. از آنجا که این دو پدیده مخالف یکدیگر است، به منظور داشتن برآوردی کلی می توان گرادیان درجه حرارت  $\Delta t / \Delta x$  را ثابت در نظر گرفت. این وضعیت در خصوص گرادیان غلظت اکسیژن  $\Delta C_0 / \Delta x$  و گرادیان غلظت بخار آب  $\Delta C_v / \Delta x$  مشابه است. شار حرارت انتقال یافته عبارت است از:

$$Q_c = -k \Delta t / \Delta x \quad J/cm^2 s \quad (۷)$$

اطلاع دقیقی از ضریب انتقال حرارتی ( $K$ ) خاک اره موجود نیست، ولی می توان از سایر فرآورده های جنگلی، برآورد قابل قبولی را در این خصوص تعمیم داد. دانسیته حجمی خاک اره خشک از یک گونه چوبی با جرم ویژه ۰/۵، برابر است با:

$$۰/۵ \times (۱/۳) = ۰/۱۶۷ g/cm^3$$

با این دانسیته، در ۲۷ درجه سانتیگراد و ۱۲ درصد رطوبت، ضریب انتقال حرارت برای تخته فیبر عایقی برابر با  $0/00036$ ، تخته خرده چوب  $0/00044$ ، چوب ماسیو عمود بر جهت الیاف  $0/000544$  و چوب ماسیو در جهت موازی با الیاف  $0/00104$  J/cm s C است (۷).

انتقال حرارت در تخته فیبر و تخته خرده چوب عمدتاً در جهت عرضی انجام می‌گیرد، ولی به علت عدم پیوستگی موجود بین خرده چوب‌ها و الیاف، هدایت حرارتی این محصولات کمتر از مقاطع عرضی چوب ماسیو با دانسیته یکسان است. در توده‌های انباشته از خرده چوب‌ها و خاک اره، ناپیوستگی‌های مشابهی وجود دارد. از طرفی، ذرات و خرده چوب‌های موجود در این توده‌ها به صورت تصادفی جهت‌گیری شده به گونه‌ای که الیاف برخی از آن‌ها در راستای شار حرارتی مستقر می‌باشند. با در نظر گرفتن این عوامل، ضریب انتقال حرارت خرده چوب به طور متوسط برابر با  $0/0006$  J/cm s C برآورد می‌شود. در مواد مرطوب ضریب انتقال حرارت به طور معنی‌داری بیشتر بوده و به حدود  $0/001$  J/cm s C در رطوبت ۳۰ درصد می‌رسد. با افزایش دما، ضریب انتقال حرارت به خصوص در مواد متخلخل مرطوب چوبی افزایش می‌یابد. (۱۲). طبق گزارش‌های موجود، دمای مرکز توده‌های انباشته از مواد لیگنوسولوزی به حدود ۶۵ درجه سانتیگراد می‌رسد. بنابراین برای متوسط دمای مرکز توده و دمای سطح آن (حدود ۴۳ درجه سانتیگراد)، به مقدار  $0/0011$  J/cm s C می‌رسد.

لازم به ذکر است Walker and Harrison در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد، ضریب انتقال حرارت خاک اره را  $0/003$  J/cm s C تعیین نمودند (۱۴). این اختلاف، به درصد رطوبت غیرعادی موجود در نمونه آزمایشی ایشان (۱۳۸ درصد) مربوط است، زیرا ضریب انتقال حرارت آب ( $0/00562$  ژول بر سانتیمتر ثانیه درجه سانتیگراد)، بسیار بیشتر از چوب خشک است.

در این مطالعه به منظور ساده سازی موضوع، ضریب انتقال حرارت برای دامنه درجه حرارت مورد نظر معادل با  $0/0011$  J/cm s C در نظر گرفته می‌شود، چون خطای حاصله در مقایسه با اثر دما بر انتقال حرارت به وسیله انتشار بخار آب ناچیز است. ضریب انتقال حرارت برای خرده چوب‌های مورد استفاده در صنایع تولید خمیر کاغذ که دارای سطوح نسبتاً زبری است، کمی بیشتر از خاک اره بوده و در حدود  $0/0013$  J/cm s C لحاظ می‌گردد (۱۳). همچنین در جداول ۱ تا ۳، شار حرارتی این مواد درج شده است.

### انتقال حرارت به وسیله بخار آب

در مواد چوبی مرطوب، ضریب انتقال حرارت با زیاد شدن دما افزایش زیادی می‌یابد، چرا که در مناطق گرم، رطوبت چوب تبخیر شده و با از دست دادن گرمای نهان تبخیر در مناطق سرد، میعان پیدا می‌کند. رطوبت می‌تواند در داخل یک سلول و در مجاورت سطح یک جداره گرم تبخیر شده، از میان حفره سلولی منتشر شده و در دیواره مقابل و نسبتاً سردتر همان سلول میعان یابد. این رطوبت ممکن است به صورت آب آغشتگی از دیواره سلولی عبور نموده و مجدداً تبخیر شود.

البته ممکن است قسمتی از این رطوبت تبخیر شده، در داخل ماده چوبی میعان پیدا نکرده و در عوض از میان چوب منتشر گردیده و به اتمسفر اطراف ماده راه پیدا نماید. به این ترتیب گرمای نهان این رطوبت از چوب خارج خواهد شد. تفکیک انتقال حرارت به وسیله میعان موقت و انتقال حرارت بدون وقوع پدیده

میعان، امری مشکل است. در دماهای بالا، مجموع حرارت منتقل شده از طریق بخار آب، سهم قابل توجهی خواهد داشت.

یادآور می‌شود، از آنجا که فشار بخار به طور مستمر با زیاد شدن درجه حرارت افزایش یافته و در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با فشار اتمسفر برابر می‌شود، در دماهای بالا حرارت زیادی توسط بخار منتقل می‌شود. در این مطالعه، حرارت انتقال یافته توسط بخار آب بر اساس نرخ‌ی که در آن رطوبت در فرآورده‌های چوبی جابه‌جا می‌شود، ارزیابی می‌گردد. در محدوده دمای ایجاد شده در توده‌های انباشته (۶۵ درجه سانتیگراد)، شار حرارتی محاسبه شده برای انتشار بخار آب (Qv)، ممکن است شامل مقداری از حرارت منظور شده در شار حرارتی مربوط به پدیده هدایت (Qc) نیز باشد، ولی خطای حاصله قابل اغماض است.

با استفاده از ضریب انتشار بخار در هوا (Dv)، می‌توان ضریب انتشار بخار در توده‌های انباشته را همانند ضریب انتشار اکسیژن برآورد نمود. به این ترتیب برای درجه حرارت متوسط بین مرکز و سطح توده خواهیم داشت (۴):

$$Dv = 0.219(T/273)^{1.75}$$

همچنین ضریب انتشار موثر آن برابر با  $Dv/16$  خواهد بود. مقدار رطوبت جابه‌جا شده در جهت عمود بر الیاف چوب ماسیو اشباع از رطوبت (۳۰ درصد) برابر با  $Dv/25$  می‌باشد (۸). انتقال رطوبت در چوب مرطوب بسیار سریعتر از اکسیژن است، چرا که دیواره‌های سلولی که به عنوان مانعی برای انتقال گازها عمل می‌کنند، رطوبت را به صورت آب آغشتگی از حفره یک سلول به حفره سلول دیگر هدایت می‌کنند.

از آنجا که مقداری از رطوبت چوب به صورت آب آغشتگی جابه‌جا شده و گرمای نهان را همانند بخار آب انتقال نمی‌دهد، جابه‌جایی نسبتاً سریع رطوبت در چوب ماسیو حاکی از آن است که در توده‌های انباشته، علاوه بر انتشار از طریق حفرات، باید پدیده انتشار از طریق خرده چوب‌ها و ذرات خاک اره را نیز در نظر گرفت. احتمالاً سرعت جابه‌جایی بخار آب در توده‌های انباشته واجد حفرات، برابر با سرعت حرکت آب در جهت عمود بر الیاف چوب ماسیو است:

$$m_v = -0.25D_v \Delta c_v / \Delta x = -0.055(T/273)^{1.75} \Delta c_v / \Delta x \quad g/cm^2s \quad (8)$$

در این مطالعه، برای انتشار بخار آب در جهت عمود بر الیاف چوب ماسیو نیز از همین معادله استفاده شد، هرچند که مقدار واقعی انتشار بخار آب احتمالاً کمتر است. سرعت جابه‌جایی رطوبت در جهت موازی با الیاف چوب ماسیو (اندیس wf)، تقریباً برابر با سرعت جابه‌جایی بخار آب در هوای راکد است، ولی نیمی از آن می‌تواند به عنوان آب آغشتگی و بدون انتقال گرمای نهان جابه‌جا شود، به طوری که:

$$m_{v wf} = 0.11(T/273)^{1.75} \Delta c_v / \Delta x \quad g/cm^2s \quad (9)$$

برای محاسبه شار حرارتی انتشار بخار آب (Qv) داریم:

$$Q_v = m_v L \quad J/cm^2s \quad (10)$$

دیفرانسیل غلظت بخار ( $\Delta Cv$ ) بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد برای خارج از توده مواد انباشته و هوای داغ اشباع از بخار داخل توده در نظر گرفته

شد. گرمای نهان بخار (L) بر حسب ژول بر گرم در دماهای مختلف از کتابچه راهنما استخراج شد. مقادیر شار حرارتی محاسبه شده برای بخار (Qv) در جداول ۱ تا ۳ آمده است.

هنگامی که هوای با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، خرده چوب‌ها را احاطه می‌کند، بخار آب از آن خارج شده و باعث خنک شدن توده انباشته می‌شود. با افزایش دما، شار حرارت منتقل شده از شار بخار آب منتشر شده فزونی می‌یابد، ولی در دماهای بالاتر جابه‌جایی بخار آب سریع‌تر افزایش یافته به طوری که مقدار Qv در تخته فیبر سبک عایقی در دمای حدود ۴۳، در تخته فیبر سخت سبک در ۶۵ درجه سانتیگراد، در توده خاک اره در ۷۷ درجه سانتیگراد و در توده‌ای از خرده چوب در ۸۰ درجه سانتیگراد با Qc برابر می‌شود (جداول ۱ تا ۳). به نظر می‌رسد در چوب ماسیو حتی در دماهای بیش از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، مقدار Qc بیش از Qv خواهد بود. تبخیر آب موجود در چوب در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد باعث می‌شود فشار بخار از فشار اتمسفر بیشتر شده و بخار بیشتر از آنکه منتشر شود از ماده خارج شده و در نتیجه Qv افزایش یابد. در چوب مرطوب و در دماهای بالاتر از جوشش آب در چوب، انتقال حرارت توسط بخار بیش از پدیده هدایت است.

### ارائه نتایج

با توجه به روابط ریاضی ارائه شده در مبانی نظری، مقادیر شار حرارتی ناشی از انتشار اکسیژن، بخار آب و هدایت حرارتی در جهات عمود و موازی با الیاف چوب، تخته فیبر سخت سبک، تخته فیبر عایقی، خاک اره و خرده چوب محاسبه و در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است. بدین ترتیب مقدار دمای تعادل توده و به عبارت دیگر، حداکثر درجه حرارت تولید شده در اثر پدیده خود گرمایی ناشی از انتشار اکسیژن، به طور تقریبی قابل برآورد است. همچنین مشاهدات تجربی حاکی از آن است که درجه حرارت توده‌های انباشته از خرده چوب و خاک اره طی مقاطع زمانی مختلف، مقادیر متفاوتی داشته و حداکثر به حدود ۶۰ الی ۶۵ درجه سانتیگراد می‌رسد.

جدول ۱- مقادیر شار حرارتی انتشار اکسیژن، هدایت و انتشار بخار آب در جهت عرضی چوب ماسیو و تخته فیبر سخت سبک با ۳۰ درصد رطوبت در دماهای مختلف (کیلوژول بر سانتیمتر مربع ثانیه)

هدایت در چوب	هدایت در تخته فیبر سخت سبک	بخار آب	اکسیژن در چوب	دما (درجه سانتیگراد)
۶/۴	۷/۳	۱/۱	۸/۳	۲۰
۱۶/۰	۸/۰	۲/۵	۸/۸	۳۰
۳۲/۰	۱۶/۰	۵/۶	۹/۳	۴۰
۴۸/۰	۲۴/۰	۱۱/۲	۹/۸	۵۰
۶۴/۰	۳۲/۰	۲۵/۴	۱۰/۴	۶۰
۸۰/۰	۴۰/۰	۳۷/۳	۱۰/۹	۷۰
۹۶/۰	۴۸/۰	۴۴/۲	۱۱/۵	۸۰
۱۱۲/۰	۵۶/۰	۶۲/۴	۱۲/۱	۹۰
۱۲۸/۰	۶۴/۰	۹۸/۷	۱۲/۷	۱۰۰



جدول ۲- مقادیر شار حرارتی انتشار اکسیژن، هدایت و انتشار بخار آب در جهت موازی با الیاف چوب ماسیو با ۳۰ درصد رطوبت در دماهای مختلف (کیلوژول بر سانتیمتر مربع ثانیه)

هدایت در چوب	بخار آب در چوب	اکسیژن در چوب	دما (درجه سانتیگراد)
۹/۲	۴/۳	۶۶/۴	۲۰
۵۷/۲	۱۲/۹	۷۰/۳	۳۰
۷۸/۷	۱۷/۱	۷۴/۵	۴۰
۱۱۸/۴	۳۳/۵	۷۸/۷	۵۰
۱۴۹/۶	۴۸/۳	۸۳/۲	۶۰
-	۶۶/۲	۸۷/۸	۷۰
-	۹۳/۷	۹۲/۰	۸۰
-	۱۴۷/۴	۹۷/۴	۹۰
-	۱۸۷/۳	۱۰۱/۶	۱۰۰

جدول ۳- مقادیر شار حرارتی انتشار اکسیژن، هدایت و انتشار بخار آب در خرده چوب، خاک اره و تخته فیبر عایقی سبک با ۳۰ درصد رطوبت در دماهای مختلف (کیلوژول بر سانتیمتر مربع ثانیه)

اکسیژن	هدایت در خرده چوب	هدایت در خاک اره	بخار آب	هدایت در تخته فیبر عایق	دما (درجه سانتیگراد)
۹۹/۲	۰/۰	۰/۰	۱/۱	۱/۲	۲۰
۱۰۲/۵	۱۱/۹	۱۰/۴	۲/۵	۳/۴	۳۰
۱۰۵/۶	۲۴/۲	۲۰/۸	۷/۸	۸/۶	۴۰
۱۰۸/۲	۴۲/۳	۲۹/۷	۱۱/۲	۱۳/۸	۵۰
۱۱۰/۴	۵۲/۱	۴۱/۶	۱۶/۸	۱۸/۲	۶۰
۱۱۲/۸	۶۷/۶	۴۹/۵	۲۹/۰	۲۱/۴	۷۰
۱۱۹/۲	۷۸/۳	۶۶/۲	۴۴/۲	۲۷/۵	۸۰
۱۲۱/۷	۹۵/۷	۷۴/۶	۶۲/۴	۳۱/۸	۹۰
۱۲۵/۶	۱۰۸/۴	۸۵/۲	۹۸/۷	۳۸/۸	۱۰۰

### بحث و تفسیر

به طور کلی، دمای فرآورده‌های جنگلی تا زمانی که مجموع شار حرارت انتقال یافته (QC) و شار انتشار بخار آب (QV) با شار انتشار اکسیژن (QO) برابر شود، افزایش می‌یابد. با توجه به جداول ۱ تا ۳، این وضعیت تعادل برای انتقال عرضی در چوب ماسیو در ۲۱ درجه سانتیگراد، برای انتقال در جهت موازی الیاف در ۳۰ درجه سانتیگراد، برای تخته فیبر سخت سبک در ۲۲ درجه سانتیگراد، برای خرده چوب‌های مناسب تولید خمیر کاغذ در ۷۳ درجه سانتیگراد، برای خاک اره در ۷۷ درجه سانتیگراد و برای تخته فیبر عایقی سبک، در دمای تقریبی ۸۱ درجه سانتیگراد ایجاد می‌شود. با توجه به نتایج حاصله، در مواد خشک که موضوع انتشار بخار مطرح نبوده و هدایت حرارتی کمتر است، دمای تعادل برای انتقال در مقاطع عرضی چوب ماسیو

در حدود ۲۳ درجه سانتیگراد، برای تخته فیبر سخت سبک در حدود ۲۹ درجه سانتیگراد و برای انتقال موازی الیاف چوب ماسیو در حدود ۴۱ درجه سانتیگراد است. البته، به واسطه لحاظ کردن مفروضات متعدد به منظور ساده سازی موضوع، این مقادیر چندان دقیق نبوده و بیشتر مقایسه نسبی آن‌ها با یکدیگر مطرح است. با توجه به نتایج حاصل از برآوردهای نظری، اکسیژن انتشار یافته به داخل مواد نسبتاً نفوذپذیر از قبیل تخته فیبر عایقی، توده‌های انباشته از خاک اره و خرده چوب، قادر است درجه حرارت آن‌ها را تا دمای جوشش آب افزایش دهد. درحالی که نتایج مشاهدات تجربی حاکی از آن است که در توده‌های انباشته از خرده چوب و خاک اره در هوای آزاد- با توجه به شرایط محیطی، ابعاد توده و سایر عوامل- درجه حرارت حداکثر تا حدود ۶۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته و تنها در صورت تبخیر عمده رطوبت موجود در توده ممکن است کمی فراتر رود. یکی از دلایل تفاوت موجود میان برآوردهای نظری با مشاهدات تجربی، انتقال مقدار زیادی حرارت از طریق پدیده همرفتی ناشی از جریان هوا در مجاری دودکش مانند موجود در این قبیل توده‌هاست.

از آنجا که جریان هوا ضمن انتقال حرارت از طریق پدیده همرفتی، موجب دخول اکسیژن به درون توده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت اکسیژن در داخل توده انباشته همواره زیاد بوده و احتمالاً برخلاف آنچه که در مبانی نظری فرض شد، هیچ‌گاه و در هیچ فاصله‌ای از سطح توده مواد به صفر نخواهد رسید.

البته لازم به ذکر است که توده‌های بزرگ انباشته از خرده چوب و خاک اره بیشتر از توده‌های کوچک در اثر پدیده خود گرمایی گرم می‌شوند (۱۳). نکته دیگر آنکه، در این مطالعه فرض شد که اکسیژن ممکن است در هر فاصله‌ای از سطح توده مصرف شود. باید توجه شود که مصرف اکسیژن موجود در مجاورت سطح با گرادیان شدید غلظت اکسیژن و در نتیجه جابه‌جایی قابل توجه اکسیژن و افزایش شار حرارتی همراه است، ولی در این حالت، اتلاف حرارت از طریق پدیده هدایت و انتشار بخار آب نیز زیاد خواهد بود.

مطلب دیگر آنکه به علت ماهیت ساده مبانی نظری مورد استفاده و برخلاف نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده در یارد کارخانه‌های تبدیل مکانیکی و شیمیایی چوب، مقادیر محاسبه شده برای دمای تعادل توده در این مطالعه مستقل از ابعاد توده است. البته بدیهی است که حتی در توده‌های بزرگ نیز تمامی اکسیژن منتشر شده مصرف نشده و مقدار اکسیژن مصرفی و حرارت تولید شده در هر واحد از حجم توده صرف نظر از ابعاد آن احتمالاً یکسان است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی و با استفاده از مدل‌های ریاضی عددی و یا تحلیلی مناسب، این موضوع بررسی گردد. از آنجا که حرارت تولید شده در اعماق یک توده بزرگ باید مسیر طولی را برای رسیدن به سطوح طی کند، خروج حرارت مستلزم آن است که توده از دمای بالایی برخوردار باشد.

به طریقی مشابه، در توده‌های انباشته از خرده چوب و خاک اره مستقر در هوای آزاد، صرفاً در دماهای خیلی بالا که اکسیداسیون مستقیم شیمیایی به نرخ اشتعال نزدیک می‌شود، پدیده خود گرمایی تحت کنترل اکسیژن است. در دماهای متوسط، دمای توده عمدتاً به پدیده همرفتی هوا وابسته بوده و حداقل تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد از طریق جریان همرفتی هوای خنک در توده قابل کنترل است (۱۰).

از آنجا که آب گرم و بخار قادرند حرارت را به خارج از توده منتقل کنند، تزریق آب به داخل مواد انباشته نیز موجب پایین نگه داشتن دمای آن می‌شود. از طرف دیگر، آب ممکن است مسیر عبور هوای خنک را مسدود نموده و در نتیجه ممکن است منافذی وجود داشته باشند که در اثر بلوکه شدن و عدم دسترسی به هوای خنک و یا آب، دچار خود گرمایی بیشتری شوند.

برخلاف مواد نفوذپذیر، در چوب ماسیو و اوراق فشرده‌ای که فاقد حفره مابین اجزای خود می‌باشند، اکسیژن قبل از نفوذ به مرکز ماده به مصرف رسیده و کمبود اکسیژن تولید حرارت را محدود می‌کند. به نظر می‌رسد این موضوع عدم خود گرمایی قابل توجه الوارهای دسته‌بندی شده بدون چوبدستک را توجیه می‌کند. همچنین فعالیت قارچ‌هایی که به سرعت روی این الوار گسترش یافته و در اعماق آن نفوذ می‌کنند، پس از مصرف "اکسیژن مقیم" موجود در آن، متوقف می‌شود.

در اثر پدیده خود گرمایی الوار و سایر فرآورده‌های جنگلی در هوای گرم، درجه حرارت ممکن است تا نقطه اشتعال افزایش یابد. این مواد در محیط گرم اطراف خشک شده و بنابراین از طریق انتشار بخار آب خنک نمی‌شوند. حتی در چنین شرایطی، انتشار اکسیژن قادر خواهد بود دما را به مقدار کمی افزایش دهد، به طوری که در زیر سطوح جانبی این افزایش دما در حدود ۶ درجه سانتیگراد و در زیر سطوح انتهایی در حدود ۲۰ درجه خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پدیده‌های هیدرولیز و پیرولیز به عنوان فرآیندهایی که به اکسیژن احتیاج ندارند، عمده حرارت را تولید می‌کنند.

در خصوص خود گرمایی فرآورده‌های نسبتاً غیر قابل نفوذ از قبیل تخته فیبرهای سخت دسته‌بندی شده به صورت داغ (پس از مرحله پرس)، یا طی فرآیند متعادل‌سازی تخته فیبرسخت و همچنین هنگام خشک کردن الوار در کوره‌های با درجه حرارت بالا، احتمالاً اکسیژن نقش عمده‌ای نداشته و این پدیده را باید به هیدرولیز و پیرولیز نسبت داد. طی خشک کردن روکش‌های چوبی و خرده چوب در خشک کن‌های مختلف صنعتی، این مواد در تماس مداوم با اکسیژن قرار داشته و از دیدگاه مبانی نظری قادر به ایجاد واکنش با آن هستند، ولی هنوز به درستی مشخص نیست در خصوص خود گرمایی این مواد، نرخ واکنش با اکسیژن و یا فرآیند پیرولیز، کدامیک نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند.

#### منابع و مآخذ

- 1-Allison AND Murphy. 1962. In: Buggeln, R. 1999. Outside Storage of Wood Chips. Biocycle.
- 2-Anon . 1988. Storage of Wood Chips. Office of The Fire Marshal of Ontario. Canada
- 3-Coulson, J. M. , AND J.F. Richardson. 1998. Chemical engineering, vol. 2, Unit operations. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom. P. 111
- 4-Gray, D. E. (ED), ET AL. 1992. American Institute of Physics handbook, 6th ed. McGraw Hill, New York. P. 250
- 5-Hawley, L. F. 1982. Combustion of Wood, Wood Chemistry, 6<sup>th</sup> ed. Reinhold Publ. Corp., New York.
- 6-Klason, P., G. v. Heidenstam, AND E. Norlin. 1970. Investigation on Dry Distillation of Wood. Zeistchr. F. Angew. Chemie
- 7-Kollman, F. P., AND W. A. Cote, JR. 1984. Principles of Wood Science and

- 
- Technology, vol. 1, Solid Wood. Springer-Verlag, Berlin, Germany. P. 249
- 8-Kubler, H. 1979. Studies on Movement of Moisture Through Wood. Holz Roh- Werkst. 15(11):453-468
- 9- Kubler, H. 1982a. Heat release in Thermally disintegrating Wood. Wood Fiber 14(3) 166-177
- 10- Kubler, H. 1982b. Air Convection in Self-heating Piles of Wood Chips. Tappi 65(8): 79-83
- 11-Kubler, H. 1982c. Self-heating of Forest Products Due to Residence Oxygen. Wood Science 15(2): 97-100
- 12- Kauhmann, G. 1972. Study On Thermal Properties of Wood and Particboard in Relation to Moisture and Temperature in The Hygroscopic Range. Holz Roh- Werkst. 20(7): 259-270
- 13-Riley. R. G. 1979. Fires in raw Material Storage. Pulp Paper 53(14): 100-103
- 14-Walker, I. K., AND W. J. Harrison. 1977. Self-heating of Wet Wood. New Zealand J. Sci. 20(2): 191-200