

ردیابی و همانند سازی شکل گیری پوسته خشک در فرایند چوب خشک کنی با بهره‌گیری از طیف سنجی با اشعه X

اصغر طارمیان^{۱*}، مهدی فائزی پور^۲

۱- استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲- استاد گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

چکیده

در این پژوهش، شکل‌گیری و پسروری پوسته خشک در ضخامت تخته‌های راش و نوئل طی خشک شدن با بهره‌گیری از روش طیف سنجی با اشعه X بررسی شد. چهار سطح از شش سطح تخته‌ها با ضخامت ۲۵ میلی‌متر با رزین اپوکسی اندود شد تا شار رطوبت تنها در جهت ضخامت انجام گیرد. از روش خشک کردن با روش جابجایی هوای گرم در دمای خشک ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰٪ برای خشک کردن تخته‌ها بهره‌گیری شد و عملیات اسکن نیز هر یک ساعت تا رسیدن پوسته خشک به مغز تخته‌ها انجام شد.

نتایج نشان داد که پوسته خشک در راش سریع‌تر از نوئل شکل می‌گیرد ولی زمان رسیدن آن به مغز تخته‌ها در تخته نوئل سریع‌تر است. همچنین، الگوی گسترش ضخامت پوسته خشک در دو گونه متفاوت بود بدینگونه که در کاج نوئل در آغاز با یک شرایط پایدار همراه بود که ناشی از جریان توده‌ای سریع آب آزاد در آن نسبت به راش است. به طور کلی می‌توان گفت که عامل کنترل‌کننده در رسیدن پوسته خشک به مغز تخته‌ها، ضریب انتشار چوب نسبت به عبور بخار آب است، نه ضریب نفوذپذیری آن.

واژه‌های کلیدی: پوسته خشک، طیف سنجی با اشعه X، جریان توده‌ای، ضریب انتشار، چوب خشک کنی

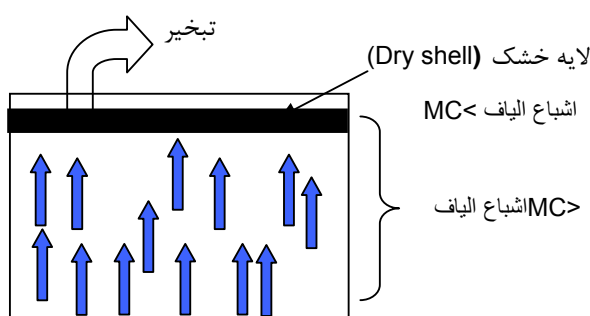
مقدمه

جای روش های مخرب مانند برش پوسته^۶ برای بررسی گسترش گرادیان رطوبت در تخته ها به هنگام خشک شدن بهره گیری شد، بررسی بر روی پدیده پسروری ناحیه تبخیر و تشکیل پوسته خشک نیز آغاز شد. به دلیل نیاز به نصب و راه اندازی این نوع تجهیزات غیرمخرب در یک کوره چوب خشک کنی و محدودیت های آن به دلیل سرمایه گذاری بالا، نتایج پژوهش های معدودی در سطح جهان بر روی پدیده شکل گیری پوسته خشک منتشر شده است (Remond و همکاران، ۲۰۰۵؛ Rosenkilde و همکاران، ۲۰۰۴؛ Wiberg، ۲۰۰۰).

بنا به نتایج Remond و همکاران (۲۰۰۵) یکی از دلایل شکل گیری الگوی معکوس گرادیان دما در ضخامت تخته به هنگام خشک شدن، تشکیل پوسته خشک در سطح آن است که مثل یک پوسته عایق عمل می کند و در اثر محصور شدن آب آزاد، دمای مغز تخته از دمای سطح آن فزونی می یابد. در این ارتباط، ضریب هدایت گرمایی چوب نیز یکی از عوامل موثر بر شکل گیری این پوسته بشمار می آید.

پسروری پوسته خشک به درون چوب را به هنگام خشک شدن می توان با روش های غیرمخرب مورد بررسی قرار داد. Rosenkilde و همکاران (۲۰۰۴) و Rosenkilde و Glover (۲۰۰۲) با بهره گیری از تصویر برداری رزونانس مغناطیسی^۷ (MRI) نشان دادند که پوسته خشک در سطح چوب تشکیل شده و تا وقتی که میانگین رطوبت چوب به رطوبت اشباع الیاف کاهش پیدا کند، این پوسته سرعت خشک شدن را کنترل می کند. همچنین، Wiberg و همکاران (۲۰۰۰) و Moren و Wiberg (۱۹۹۹) با بهره گیری از سی تی اسکن با اشعه X^۸ پسروری پوسته خشک را در سه گونه کاج جنگلی (Pinus sylvesteris)، نوئل نروژ (Picea abies) و توس (Betula pubescens) در دماهای خشک ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس بررسی کردند. در بین این سه گونه، ناحیه تبخیر در گونه کاج نوئل با سرعت کم تری پسروری

پوسته خشک^۱ عبارت است از پوسته ای نازک به ضخامت یک میلی متر و کم تر با رطوبت کم تر از رطوبت اشباع الیاف که بلافاصله پس از شروع عملیات خشک کردن چوب و در اثر پسروری ناحیه تبخیر^۲ نزدیک به سطح آن تشکیل می شود (Keey و همکاران، ۲۰۰۰). در این پوسته، جریان توده ای آب آزاد^۳ متوقف شده و فرایند انتقال رطوبت تنها با سازوکار انتشار آب پیوندی و بخار آب صورت می گیرد و این در حالی است که در زیر این پوسته، جریان توده ای آب آزاد برقرار است. (شکل ۱)



شکل ۱- شمایی از تشکیل پوسته خشک در تخته طی خشک شدن

اهمیت بررسی شکل گیری پوسته خشک در یک فرایند چوب خشک کنی شامل موارد زیر است:

- ۱- مدل سازی و تحلیل جریان توده ای آب آزاد و انتشار بخار آب در دامنه رطوبتی بالاتر از رطوبت اشباع الیاف.
- ۲- مدل سازی فرایند انتقال گرما در چوب در فاز آب آزاد.
- ۳- تعیین زمان رسیدن پوسته خشک به مغز تخته ها و در نتیجه تعویض به موقع گام دمای خشک کوره برپایه برنامه و جلوگیری از بروز معایب چوب خشک کنی به ویژه شان عسلی شدن^۴ (ترک درونی^۵).

پژوهش بر روی پدیده شکل گیری پوسته خشک در فرایند چوب خشک کنی، از پژوهش های به نسبت جدید در این عرصه بشمار می آید. در حقیقت، از زمانی که روش های غیرمخرب مانند طیف سنجی با اشعه X به

¹ Dry shell

² Evaporation front

³ Bulk flow of free water

⁴ Honey combing

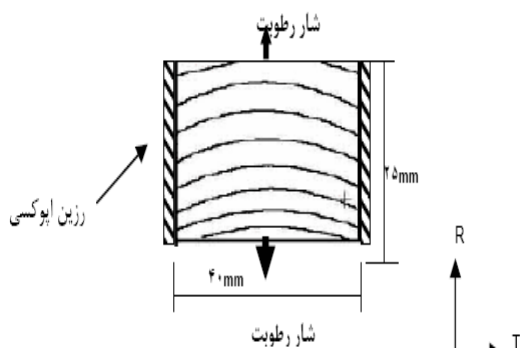
⁵ Internal check

⁶ Slicing

⁷ Magnetic resonance imaging

⁸ x-ray CT scanning

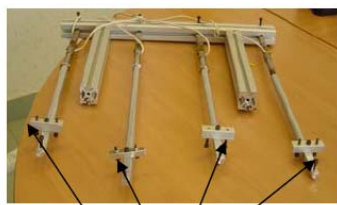
به منظور محدود کردن بهتر جریان رطوبتی در یک جهت (در جهت ضخامت تخته)، چهار سطح از شش سطح تخته ها با دو لایه رزین اپوکسی اندود شد (شکل ۲).



شکل ۲- روش آماده سازی نمونه ها برای بررسی پسروی پوسته خشک طی خشک شدن

روش خشک کردن تخته ها

از یک کوره استوانه ای و خشک کردن به روش جابجایی هوای گرم^۲ با دمای خشک 60°C و رطوبت نسبی ۷۰٪ (معادل رطوبت تعادل ۱۲٪) بهره گیری شد. کوره چند منظوره و مجهز به منبع اشعه X برای اسکن تخته ها بود. به منظور تعیین رطوبت جاری بار کوره، همه تخته ها با بهره گیری از یک کرنش سنج، به صورت خودکار هر ۵ دقیقه تا رسیدن به رطوبت نهایی حدود ۱۲٪ توزین شدند (شکل ۳).



محل قرار گرفتن نمونه ها

شکل ۳- گیج کرنش سنج مورد بهره گیری برای توزین نمونه ها طی خشک شدن

می کند و در گونه توس با سرعت بیشتر. ایشان، همچنین نتیجه گیری کردند که در هر سه گونه، سرعت پسروی پوسته خشک تا رسیدن رطوبت چوب به رطوبت میانگین برابر با رطوبت اشباع الیاف روند افزایشی دارد و با افزایش دمای خشک کوره بر سرعت آن افزوده می شود. Remond و همکاران (۲۰۰۵) شکل گیری پوسته خشک را در فرایند چوب خشک کنی مدل سازی کردند و در نهایت معادله ای را برای محاسبه ضخامت پوسته خشک معرفی کردند.

در این پژوهش با هدف دستیابی بر عوامل کنترل کننده و موثر بر الگوی گسترش پوسته خشک، از روش طیف سنجی با اشعه X برای ردیابی پسروی پوسته خشک در دو تخته راش (پهن برگ) و کاج نوئل (سوزنی برگ) بهره گیری شد تا با بهره گیری از الگوی گسترش پوسته خشک در این دو گونه و همانند سازی جریان توده ای آب آزاد بر پایه بروز این پدیده، بتوان تحلیل مناسبی از سازوکار انتقال رطوبت در چوب در دامنه رطوبتی بالاتر از رطوبت اشباع الیاف به عمل آورد. همچنین، یکی از هدف های کاربردی این پژوهش، ارایه زمان مناسب برای تعویض گام دمای خشک کوره بر پایه زمان رسیدن پوسته خشک به مغز تخته است.

مواد و روش ها

از گونه نوئل نروژ (Picea abies) به عنوان گونه سوزنی برگ و از گونه راش اروپا (Fagus sylvatica) به عنوان گونه پهن برگ در این پژوهش بهره گیری شد. در اوایل فصل بهار، از جنگل آنگرف^۱ در نزدیک نانسی فرانسه، دو پایه درخت قطع شد و بلافاصله پس از عملیات تبدیل، برای جلوگیری از کاهش رطوبت، تخته های سبز بریده شده در چند نایلون پلاستیکی قرار گرفته و به محل سردخانه منتقل شدند.

آماده سازی نمونه ها

از هر یک از گونه های یاد شده، سه تخته مماسی به ابعاد $25 \times 40 \times 80$ میلیمتر ($L \times T \times R$) بریده شد.

² Air convective drying

¹ Engref

طیف سنجی با اشعه X

تجهیزات مورد بهره‌گیری و روش اسکن در ضخامت تخته‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. به منظور ردیابی پسروری پوسته خشک، اسکن از آغاز خشک شدن، هر یک ساعت تا رسیدن پوسته خشک به مغز در ۱۴ نقطه از ضخامت تخته انجام شد. جدول (۱) محل اسکن در ضخامت تخته را نشان می‌دهد. در یک طرف کوره، از یک منبع اشعه X برای تابش اشعه و در طرف مقابل آن از یک آشکارساز برای شناسایی پرتوهای عبوری از نمونه چوبی و اندازه‌گیری فوتون‌ها بهره‌گیری شد. برای جلوگیری از پراکنش اشعه X و عبور آن تنها از درون نمونه چوبی، از دو عدد کولیماتور^۱ یک میلیمتری در مجاورت منبع اشعه X و آشکارساز^۲ به منظور متمرکز کردن پرتوهای تابیده شده بهره‌گیری شد. روش اندازه‌گیری رطوبت چوب، با بهره‌گیری از طیف سنجی با اشعه X یک روش غیرمستقیم است، به این ترتیب که با اندازه‌گیری چگالی (دانسیته) نمونه چوبی (بر پایه شمار فوتون‌های جذب شده توسط نمونه) که متشکل از چگالی ماده دیواره سلولی و آب موجود در آن است و با اطلاع از چگالی خشک نمونه یادشده، می‌توان رطوبت جاری آن را طی خشک شدن اندازه‌گیری کرد. به همین دلیل، در پایان عملیات خشک شدن، پس از خارج کردن تخته‌ها از کوره، توسط یک اره با شکاف اره ۱ میلی‌متر، شمار پوسته بریده و با روش خشک کردن در اتو، گردایان تراکم خشک در ضخامت تخته‌ها تعیین شد.

نتایج و بحث

پسروری پوسته خشک در ضخامت تخته‌ها با گذشت

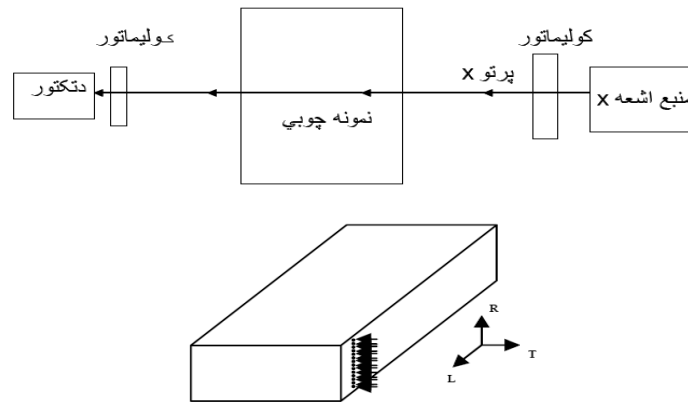
زمان

نتایج نشان داد که پوسته خشک در تخته راش سریع‌تر از تخته نوئل شکل می‌گیرد. در تخته راش، پوسته خشک به ضخامت یک میلی‌متر، پس از ۴ ساعت و در تخته نوئل، بعد از ۶ ساعت تشکیل شد. همچنین، نتایج نمایانگر از آن بود که پوسته خشک در تخته نوئل سریع‌تر از تخته راش به مغز تخته می‌رسد (شکل ۴). در تخته

نوئل، پوسته خشک پس از ۲۴ ساعت و در تخته راش پس از ۳۴ ساعت، به مغز تخته رسید. الگوی گسترش پوسته خشک نیز در هر دو تخته متفاوت بود. در تخته کاج نوئل، در ۱۶ ساعت آغازین خشک شدن، شرایط پایدار^۳ در ضخامت پوسته خشک دیده شد. در حالی که در تخته راش، ضخامت پوسته خشک از همان آغاز عملیات خشک شدن، افزایش تدریجی نشان داد. (شکل ۵). علت بروز این تفاوت، ناشی از جریان توده‌ای (جریان مویبندی) سریع در تخته کاج نوئل نسبت به تخته راش است که باعث می‌شود، آب آزاد با سرعت زیاد به سطح تخته رسیده و از افزایش ضخامت پوسته خشک جلوگیری کند. همچنین، الگوی گسترش پوسته خشک نشان داد که یک افزایش ناگهانی در ضخامت پوسته خشک که سبب می‌شود پوسته خشک به مغز تخته‌ها برسد، در تخته راش پس از ۲۱ ساعت و در تخته نوئل پس از ۱۶ ساعت رخ می‌دهد که نمایانگر توقف کامل جریان توده‌ای آب آزاد در هر دو نوع تخته است. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج بررسی‌های Keey و همکاران (۲۰۰۰)، Wiberg (۲۰۰۰) و Wiberg و Moren (۱۹۹۹) همخوانی دارد.

¹ Collimator
² Detector

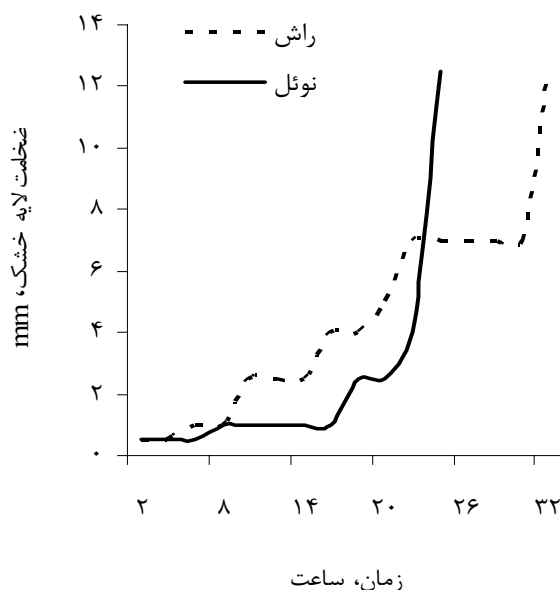
³ Steady- state



شکل ۴- طرز قرار گیری تجهیزات اسکن و روش اسکن با اشعه X در ضخامت تخته ها

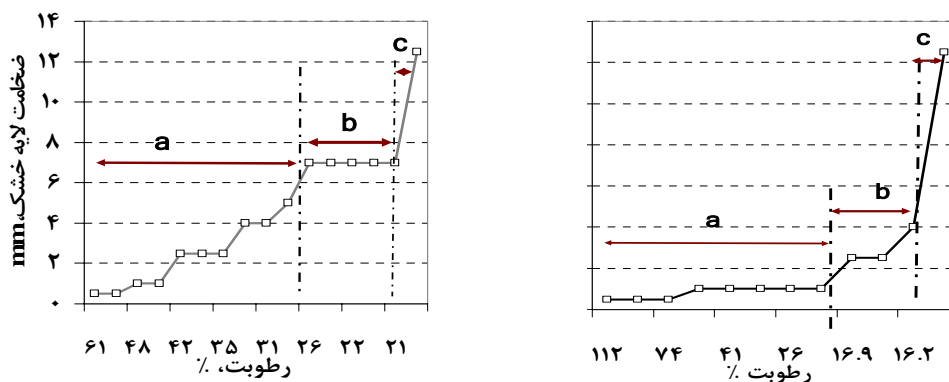
جدول ۱- محل اسکن در ضخامت تخته

نقاط اسکن	تخته ۲۵ میلیمتری
۱	%۵
۲	%۱۰
۳	%۱۵
۴	%۲۰
۵	%۲۷
۶	%۳۵
۷	%۴۵
۸	%۵۵
۹	%۶۵
۱۰	%۷۳
۱۱	%۸۰
۱۲	%۸۵
۱۳	%۹۰
۱۴	%۹۵



شکل ۵- گسترش پوسته خشک در ضخامت تخته های راش و نوئل با گذشت زمان طی خشک شدن زمان، ساعت

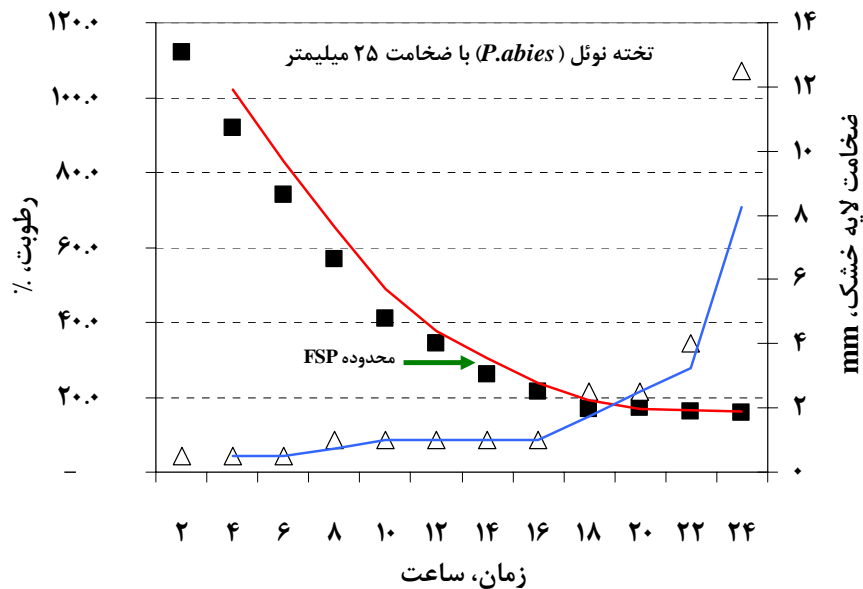
توسعه پوسته خشک در ضخامت تخته ها در سه دامنه رطوبتی
 گسترش پوسته خشک در ضخامت تخته راش و نوئل را می توان در سه دامنه رطوبتی به طور مجزا مورد بررسی قرار داد. (شکل ۶)



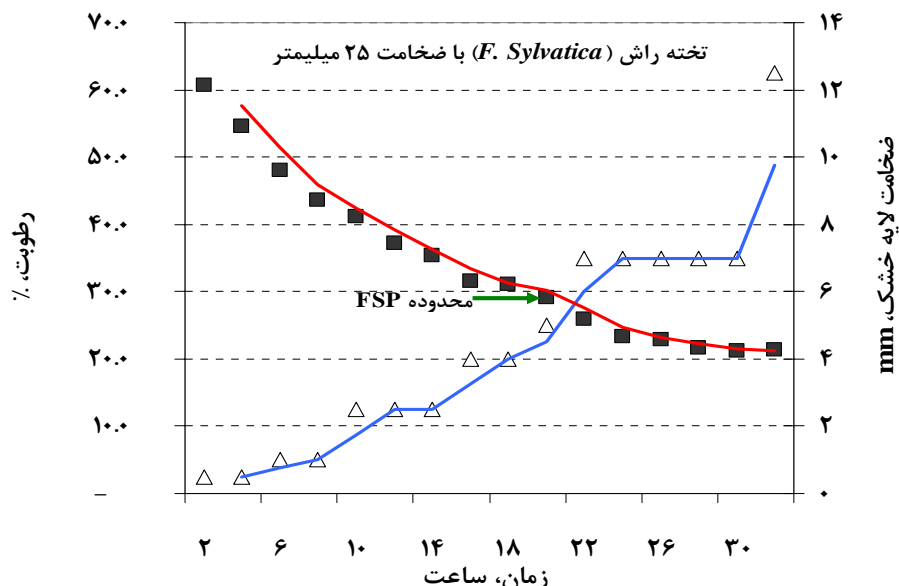
شکل ۶- گسترش پوسته خشک در ضخامت تخته ها در سه دامنه رطوبتی، الف) نوئل و ب) راش

پایدار در ضخامت پوسته خشک رخ داد و ضخامت پوسته خشک در حد ۷ میلی‌متر ثابت باقی ماند. در مرحله پایانی که بسیار سریع رخ داد، در دامنه رطوبتی کم تر از ۱٪، ضخامت پوسته خشک از ۷ میلی‌متر به ۱۲/۵ میلی‌متر افزایش یافت. همان طور که در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است، در هر دو تخته راش و نوئل، محل تقاطع دو منحنی نرخ خشک شدن و منحنی گسترش ضخامت پوسته خشک پایین تر از رطوبت اشباع الیاف قرار دارد و با فرض رطوبت اشباع الیاف به میزان ۳۰٪، ضخامت پوسته خشک در این رطوبت در تخته نوئل کم تر از ۲ میلی‌متر و در تخته راش حدود ۶ میلی‌متر است. به عبارت دیگر، وقتی رطوبت میانگین تخته به رطوبت اشباع الیاف می‌رسد، پوسته خشک به ویژه در تخته نوئل هنوز از مغز تخته فاصله قابل توجهی دارد و در نتیجه تعویض گام دمای خشک در این مرحله ممکن است منجر به بروز معایب چوب خشک کنی شود.

در تخته نوئل از رطوبت سبز تا رطوبت میانگین ۱۷٪، شرایط پایدار در ضخامت پوسته خشک دیده شد و ضخامت پوسته خشک در حد یک میلی‌متر تا حدودی ثابت باقی ماند. از رطوبت میانگین ۱۷٪ تا ۱۶٪ افزایش تدریجی در ضخامت پوسته خشک پدید آمد و ضخامت پوسته خشک از یک میلی‌متر به ۴ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. در مرحله پایانی، افزایش ناگهانی در ضخامت پوسته خشک رخ داد و در دامنه رطوبتی کم تر از ۱٪، ضخامت پوسته خشک از ۴ میلی‌متر به ۱۲/۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. مرحله پایانی بسیار سریع رخ داد. شکل ۵ زمان گسترش لایه خشک را نشان می‌دهد. در تخته راش، الگوی گسترش پوسته خشک متفاوت بود. به طوری که از رطوبت سبز تا رطوبت میانگین ۲۶٪، افزایش تدریجی در ضخامت پوسته خشک دیده شد و ضخامت پوسته خشک تا ۷ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. در مرحله دوم، در دامنه رطوبتی ۲۶ تا ۲۱٪، شرایط



شکل ۷- منحنی نرخ خشک شدن تخته نوئل و گسترش پوسته خشک در آن



شکل ۸- منحنی نرخ خشک شدن تخته راش و گسترش پوسته خشک در آن

جریان توده ای آب آزاد کمتر ولی از رطوبت اشباع الیاف بالاتر بوده و در نتیجه انتقال رطوبت در این مرحله تنها با پدیده انتشار بخار آب صورت می گیرد.

در این مرحله، ضخامت پوسته خشک، ۵ میلی متر است. در تخته کاج نوئل، در مرحله دوم، پوسته خشک به ضخامت ۲/۵ میلی متر رسیده ولی جریان توده ای آب آزاد به طور کامل متوقف نشده و انتقال رطوبت در این مرحله در این تخته برخلاف تخته راش با دو سازوکار جریان توده ای و انتشار صورت می گیرد.

مرحله دوم در تخته کاج نوئل، ۸ ساعت و در تخته راش، ۳۲ ساعت به طول انجامید. بنابراین، می توان گفت که عامل تعیین کننده در رسیدن پوسته خشک به مغز تخته، ضریب انتشار چوب (معرف سرعت انتشار رطوبت) است و نه ضریب نفوذپذیری آن (معرف سرعت جریان توده ای).

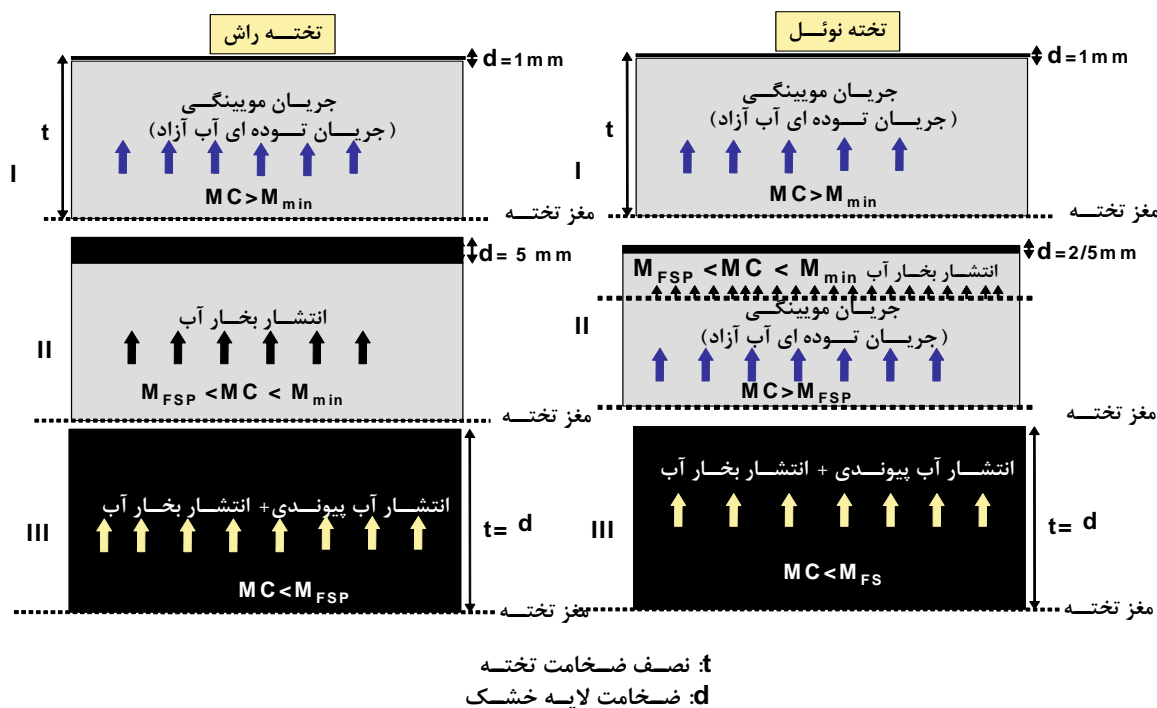
در مرحله سوم، در هر دو تخته، پوسته خشک به مغز تخته رسیده و انتقال رطوبت در کل ساختمان تخته ها با دو سازوکار انتشار آب آغشتگی و انتشار بخار آب صورت می گیرد. فرایند انتقال رطوبت در تخته نوئل پس از ۲۴ ساعت و در تخته راش پس از ۴۸ ساعت به این مرحله رسید.

همانند سازی شار رطوبتی در تخته ها طی خشک شدن

با بهره گیری از پدیده شکل گیری پوسته خشک

با بهره گیری از ردیابی پسروی پوسته خشک به طرف مغز تخته های مورد بررسی، سازوکار انتقال رطوبت در آن ها با خشک شدن در دامنه رطوبتی بالاتر از رطوبت اشباع الیاف همانند سازی شد. نتایج مربوط به این همانند سازی در شکل ۹ ارایه شده است. همانند سازی شار رطوبت در هر یک از تخته ها در سه مرحله انجام شد.

در مرحله اول، پوسته خشک به ضخامت یک میلی متر در سطح تخته ها تشکیل شد. در این پوسته خشک، جریان توده ای آب آزاد به طور کامل متوقف شده و انتقال رطوبت تنها با سازوکار انتشار آب پیوندی و بخار آب انجام می گیرد، در حالی که در زیر این پوسته، جریان توده ای آب آزاد رخ می دهد. در واقع، در این مرحله میانگین رطوبت تخته از رطوبت کمینه مورد نیاز برای برقرار شدن جریان توده ای آب آزاد بالاتر است ($M > M_{min}$). این مرحله در هر دو تخته در حدود ۱۰ ساعت به طول انجامید. در مرحله بعد جریان توده ای آب آزاد در تخته راش به طور کامل متوقف شد. در این مرحله، رطوبت تخته از کمینه رطوبت مورد نیاز برای



شکل ۹- همانند سازی شار رطوبت در دو تخته راش و نوئل طی خشک شدن با در نظر گرفتن پدیده شکل گیری پوسته خشک و پسروی آن به مغز تخته ها، در سه مرحله I، II و III. M_{min} : کمینه رطوبت مورد نیاز در چوب برای برقرار شدن جریان توده ای آب آزاد، MC : رطوبت جاری چوب، M : اشباع الیاف، رطوبت اشباع الیاف چوب

که هرچند در تخته راش، پوسته خشک سریع تر شکل می گیرد ولی در مقایسه با چوب نوئل دیرتر به مغز تخته می رسد و مرحله پایانی گسترش پوسته خشک (مرحله ای که انتقال رطوبت به طور عمده با پدیده انتشار بخار آب صورت می گیرد) در تخته کاج نوئل بسیار سریع تر و ناگهانی تر از تخته راش رخ می دهد. بنابراین، می توان نتیجه گیری کرد که عامل کنترل کننده در شکل گیری اولیه پوسته خشک، ضریب نفوذپذیری و جریان توده ای آب آزاد در چوب است، ولی عامل تعیین کننده در رسیدن این پوسته به مغز تخته، ضریب انتشار چوب نسبت به عبور بخار آب است و نه ضریب نفوذپذیری آن. با توجه به این که در هر دو تخته، پوسته خشک در رطوبت میانگین کم تری از رطوبت اشباع الیاف به مغز تخته رسید (در تخته راش، در رطوبت میانگین برابر با ۲۱٪ و در تخته نوئل در رطوبت میانگین برابر با ۱۶٪)،

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که پوسته خشک بلافاصله پس از قرار دادن نمونه ها درون کوره، به ضخامت یک میلی متر در سطح تخته ها تشکیل می شود. در دو تخته راش و کاج نوئل، نه تنها سرعت رسیدن پوسته خشک به مغز تخته ها متفاوت بود، بلکه الگوی گسترش پوسته خشک در ضخامت این تخته ها نیز تفاوت داشت. تفاوت های موجود، از جریان توده ای سریع تر آب آزاد و نیز ضریب انتشار بخار آب بالاتر در چوب نوئل نسبت به چوب راش نشأت می گیرد. جریان توده ای آهسته آب آزاد در چوب راش منجر به شکل گیری سریع تر پوسته خشک و ضخامت بیشتر آن می شود و در مقابل در چوب نوئل، به دلیل جریان توده ای سریع آب آزاد، ضخامت پوسته خشک، به مدت ۱۶ ساعت از شروع خشک شدن در حد یک میلی متر باقی می ماند. نتیجه گیری مهم این است

سپاسگزاری

پژوهشگران این پژوهش وظیفه خود می دانند که از Prof. Patrick Perre، رئیس مرکز تحقیقاتی لرماب (LERMAB) نانسی فرانسه و Dr. Romain Remond به دلیل مهیا کردن امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز و همکاری صمیمانه ایشان، قدردانی نمایند. این پژوهش، با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران و موسسه تحقیقاتی لرماب فرانسه انجام پذیرفت.

بنابراین پیشنهاد می شود برای جلوگیری از بروز معایب چوب خشک کنی به ویژه ترک های داخلی (شان عسلی شدن)، زمان تعویض دمای خشک کوره برابر برنامه چوب خشک کنی به جای این که بر مبنای رطوبت میانگین اشباع الیاف باشد، در میانگین رطوبت کم تری از رطوبت اشباع الیاف انجام گیرد.

منابع

- 1- Keey, R.B., Langrish, T.A.G. and Walker, J.C.F., 2000. Kiln-drying of lumber, Springer series, 312p.
- 2- Remond, R., Mougel, E. and Perre, P., 2005. Using the concept of thin dry layer to explain the evolution of thickness, temperature and moisture content during convective drying of Norway spruce boards, LERMAB (Laboratory of Wood Science), ENGREF, Nancy, France
- 3- Rosenkilde, A. and Glover, P., 2002. High resolution measurement of the surface layer moisture content during drying of wood using a novel magnetic resonance imaging technique, Holzforschung, 56: 312-317.
- 4- Rosenkilde, A., Jean Philippe, G. and Amanda, B., 2004. Measurement of moisture content profile during drying of scots pine using magnetic resonance imaging, Holzforschung, 58: 138-142.
- 5- Wiberg, P. and Moren, T.J., 1999. Moisture flux determination in wood during drying above fiber saturation point using CT-scanning and digital image processing. Holz als Roh- und Werkstoff, 57: 137-144.
- 6- Wiberg, P., Sehlstedt-Persson, S.M.B. and Moren, T.J., 2000. Heat and mass transfer during sapwood drying above the fiber saturation point, Drying Technology, 18(8): 1647-1664

Tracking and Simulation of Dry Shell Formation in a Wood Drying Process by X-ray Spectroscopy

Asghar Tarmian^{*1}, Mehdi Faezipour²

Abstract

In this research, dry shell formation and receding of evaporation front through the thickness of beech and spruce boards were investigated during drying using X-ray spectroscopy.

Four surfaces of the boards were coated using epoxy resin to limit moisture flux through the board thickness. The boards were dried using a convectional drying method under the temperature of 60°C and relative humidity of 70%. The scanning process was conducted once in an hour during drying until the dry shell reached the core layer of the boards.

The results revealed that the dry shell was formed faster in the beech board in comparison with the spruce one; however, it reached the core layer of the spruce board in a shorter time. In addition, the pattern of dry shell formation was found to be different between the boards; a steady-state condition as a result of faster bulk flow of free water was observed during the early stage of drying of the spruce board.

In general, it can be concluded that the controlling factor in the dry shell development to the core layer is water vapor diffusion coefficient of the boards rather than their permeability.

Key words: Dry shell, X-ray spectroscopy, Bulk flow, Diffusion coefficient

* Corresponding author: Email: tarmian@ut.ac.ir