

تعیین الگوی دینامیک همکشیدگی چوب راش و نوئل طی خشک‌شدن با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی با اشعه X

اصغر طارمیان^{*۱}

^۱ دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۰۱، تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۲/۱۹)

چکیده

در این تحقیق، الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب راش (*Fagus sylvatica*) و نوئل (*Picea abies*) طی خشک‌شدن به صورت غیرمخرب و پیوسته با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی با اشعه X بررسی شد. همچنین، مطالعات میکروسکوپ الکترونی (ESEM) و الگوی توسعه گرادیان رطوبت نیز انجام شد تا تشخیص دقیقی از رفتار دینامیکی همکشیدگی این دو چوب ارائه گردد. نتایج نشان داد که الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب راش و نوئل متفاوت است؛ همکشیدگی چوب راش به هنگام جریان توده‌ای (مویبندی) آب آزاد و همزمان با کاهش رطوبت سطح بلوک چوبی به زیر نقطه اشباع فیبر آغاز شد؛ در حالی که همکشیدگی چوب نوئل فقط در هنگام انتشار آب آغشتگی رخ داد. نوساناتی در الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب راش مشاهده شد که بیانگر همکشیدگی ناهمگن تر آن در مقایسه با چوب نوئل است. در هر دو چوب به‌ویژه چوب راش، در دامنه انتشار آب آغشتگی و در رطوبت نزدیک به رطوبت نهائی با وجود کاهش رطوبت، همکشیدگی رخ نداد. با توجه به عدم مشاهده آثاری از چین‌خوردگی سلول‌ها در چوب راش، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که همکشیدگی قابل ملاحظه چوب راش در دامنه آب آزاد نمی‌تواند ناشی از چین‌خوردگی سلول‌ها در اثر کشش مویبندی باشد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، همکشیدگی، راش، نوئل، طیف‌سنجی با اشعه X

مقدمه

همکشیدگی^۱ یکی از خواص فیزیکی مهم چوب است و عبارت است از کاهش ابعاد چوب به ویژه در جهت عرضی در اثر از دست دادن رطوبت در دامنهٔ نم‌پذیر^۲. بسیاری از معایب چوب که طی خشک‌شدن اتفاق می‌افتد و نیز معایبی که در شرایط سرویس رخ می‌دهد، ناشی از همکشیدگی چوب است. بنابراین، مطالعات متعددی بر روی پارامترهای موثر بر همکشیدگی چوب، پیش‌بینی و کنترل آن انجام شده است. در فرایند چوب خشک‌کنی، اغلب همکشیدگی چوب وقتی شروع می‌شود که لایهٔ سطحی آن به رطوبت نقطه اشباع فیبر^۳ می‌رسد. بنابراین، بسته به شیب گرادین رطوبت، همکشیدگی چوب ممکن است در میانگین رطوبت بیشتر از نقطه اشباع فیبر شروع شود. تغییرات رطوبت در دامنهٔ آب آزاد معمولاً منجر به تغییر ابعاد چوب نمی‌شود. با وجود این، هنگامی که چوب از شرایط رطوبت سبز خشک می‌شود، در صورتی که تنش‌های ناشی از خشک‌شدن برای مثال نیروهای ناشی از کشش موینگی بالا باشد، دیوارهٔ سلول‌ها در مقابل این تنش‌ها مقاومت نکرده و دچار چین‌خوردگی (کلاپس)^۴ می‌شوند. در این حالت، هنگامی که رطوبت چوب هنوز بالاتر از نقطه اشباع فیبر است، چوب دچار همکشیدگی می‌شود. به این نوع همکشیدگی، همکشیدگی ناشی از چین‌خوردگی^۵ گفته می‌شود. وقوع این نوع همکشیدگی در بعضی از گونه‌های چوبی مانند بلوط و اکالیپتوس گزارش شده است (Yi-qiang et al., 2005; Perré, 2007). بررسی الگوی دینامیک همکشیدگی چوب طی خشک‌شدن در کوره اطلاعات مفیدی در ارتباط با وقوع پدیده چین‌خوردگی و توسعه تنش‌های داخلی می‌دهد. بر اساس اظهارنظر Fuller (2000) می‌توان برنامه‌های چوب خشک‌کنی را براساس الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب کنترل و تدوین کرد. مطالعات متعددی در زمینه تاثیر پارامترهای متعدد بر همکشیدگی چوب انجام شده است (Perre, 2007; Wang et al., 2008; Khademi-Eslam et al., 2010; Leonardon et al., 2010). در مورد بررسی الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب طی خشک‌شدن به دلیل نیاز به تجهیزات غیرمخرب و گاهی اوقات گران‌قیمت تحقیقات اندکی انجام شده است. مطالعات Almeida et al., (2008) بر روی اندازه‌گیری همکشیدگی چوب با تابش لیزر نشان داد که در

دامنهٔ رطوبتی ۲۰ و ۴۰ درصد بین همکشیدگی مماسی چوب راش و رطوبت رابطه خطی وجود ندارد. آن‌ها علت وقوع این مسئله را به بروز پدیدهٔ چین‌خوردگی در سلول‌های اشعه نسبت دادند. نرخ همکشیدگی آزاد^۶ چوب کششی و چوب نرمال گونهٔ اکالیپتوس در حین خشک‌شدن با تابش لیزر مطالعه شده است و نتایج نشان داده است که در چوب نرمال، همکشیدگی بلافاصله بعد از شروع عملیات خشک‌کردن (رطوبت اولیه: ۱۶۰ درصد) رخ می‌دهد (Perré, 2007). سپس، نرخ همکشیدگی تا رطوبت ۴۰ درصد افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، مقداری از پدیدهٔ چین‌خوردگی که در فاز آب آزاد در چوب نرمال رخ می‌دهد، بازیابی می‌شود. در مورد چوب کششی، همانند چوب نرمال، همکشیدگی بلافاصله بعد از شروع عملیات خشک‌کردن، رخ داده ولی برخلاف چوب نرمال، منحنی همکشیدگی خطی است. پدیدهٔ همکشیدگی چوب را می‌توان در مقیاس مولکولی، فرامیکروسکوپی، میکروسکوپی و ماکروسکوپی بررسی کرد. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری دقیق همکشیدگی چوب پیشنهاد شده است که به موارد زیر می‌توان اشاره کرد. Kokutse et al., (2010) از طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز (NIRS)^۷ به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی همکشیدگی و نقطه اشباع فیبر چوب گونه تیک (*Tectona grandis*) با موفقیت استفاده کردند. به طور مشابه Taylor et al., (2008) نیز از این تکنیک غیرمخرب برای ارائه مدل پیش‌بینی همکشیدگی چوب استفاده کردند. Perré & Hubber (2007) با استفاده از یک میکروسکوپ نوری از نوع انعکاسی و دوربین دیجیتال متصل به آن همکشیدگی آزاد چوب آغاز و چوب پایان را طی خشک‌شدن اندازه‌گیری کردند. Sakagami et al., (2007) از یک میکروسکوپ لیزری پیمایشی همکانونی (CLSM)^۸ برای بررسی همکشیدگی سلول‌های تراکئیدی گونهٔ *Pinus densiflora* استفاده کردند. در تحقیق حاضر، از تکنیک طیف‌سنجی با اشعهٔ X برای بررسی الگوی دینامیک همکشیدگی دو چوب راش (*Fagus sylvatica*) و نوئل (*Picea abies*) طی خشک‌شدن استفاده شد. هدف از انتخاب دو گونه چوبی راش و نوئل، کاربردهای تجاری مختلف این دو گونه و نیز ضریب همکشیدگی عرضی متفاوت آن‌ها بود. بر این اساس، عملکرد تکنیک اشعهٔ X برای بررسی الگوی دینامیک

¹ Shrinkage

² Hygroscopic

³ Fiber saturation point

⁴ Collapse

⁵ Collapse-type shrinkage

⁶ Free shrinkage

⁷ Near-infrared spectroscopy

⁸ Confocal laser scanning microscopy

- تجهیزات طیف‌سنجی با اشعه X و واسنجی^۲ آن

منبع اشعه X لوله‌ای از جنس تنگستن بود که جریان پیوسته‌ای از طیف را تولید می‌کرد. دامنه فعالیت این منبع، با انرژی حداکثر ۶۰ KV و شدت حداکثر ۰/۱۰ mA بود. از جریان آب در دمای ۲۵ °C برای خنک کردن منبع اشعه X استفاده شد. برای آشکار کردن شدت اشعه X از یک آشکارساز^۴ استفاده شد. آشکارساز اشعه X، یک عنصر کادمیوم تلور^۵ از نوع Amptek PX-100T بود. در این مطالعه، برای واسنجی انرژی، از فلورنس ورقه‌های اندیوم^۶ و مولیبدنیوم^۷ استفاده شد. همچنین، از یک موازی‌ساز^۸ دو میلیمتری در سمت منبع و یک موازی‌ساز تنگستن یک میلیمتری در سمت گیرنده اشعه جهت متمرکز کردن اشعه استفاده شد. شدت منبع اشعه X به مقدار ۰/۱۹ mA تنظیم شد. از یک برنامه ویژال بیسیک^۹ نیز برای کنترل برنامه و ذخیره داده‌ها استفاده شد.

- روش پیمایش^{۱۰}

برای پیمایش بلوک‌های چوبی، سه مرحله زیر اجرا شد:

- ۱- پیمایش سریع جهت شناسایی لبه‌های بلوک چوبی (حد بالا و حد پایین بلوک)
- ۲- اندازه‌گیری پرتو جاری^{۱۱} لبه‌های بلوک با حداکثر انحراف شدت طیف شناسایی شد.
- ۳- اندازه‌گیری پرتو عبوری^{۱۲} اشعه X در قسمت بالا یا پایین نمونه به مدت ۱۵۰ ثانیه برای اندازه‌گیری دقیق پرتو جاری گسیل شد. با این پیمایش، شدت اشعه X بدون عبور از نمونه اندازه‌گیری شد.

۳- اندازه‌گیری پرتو عبوری^{۱۲} به منظور ثبت کاهش ضخامت بلوک‌های چوبی، تعداد فوتون‌های منتقل شده از لبه‌های نمونه طی خشک شدن اندازه‌گیری شد. با اطلاع از حداکثر انحراف شدت طیف و نیز پرتو جاری، ضخامت بلوک‌ها طی خشک شدن به صورت پیوسته هر ساعت یک بار ثبت شد.

همکشیدگی برای چوب‌هایی با ساختمان آناتومی مختلف (پهن‌برگ و سوزنی‌برگ) و نیز با ضریب همکشیدگی مختلف بهتر ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

- نمونه برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، از چوب‌های راش (*Fagus sylvatica*) و نوئل (*Picea abies*) استفاده شد. درختان مورد نظر از یک جنگل آموزشی، متعلق به موسسه تحقیقاتی آنگرف^۱ در نزدیکی نانسو فرانسه قطع شدند. سه بلوک چوبی با الگوی برش مماسی به ابعاد ۴۰ × ۲۵ × ۸۰ میلی‌متر (L×R×T) از قسمت چوب برون هریک از چوب‌ها بریده شد. سپس، برای حفظ رطوبت، بلوک‌ها در پوشش پلاستیکی در سردخانه در دمای ۴ °C نگهداری شدند. قبل از خشک کردن، چهار سطح از شش سطح بلوک‌ها با دو لایه رزین اپوکسی آغشته شد تا رطوبت فقط در امتداد ضخامت بلوک‌ها جریان پیدا کند.

- خشک کردن نمونه‌ها

از یک کوره چوب خشک‌کنی چند منظوره سیلندری مجهز به تجهیزات طیف‌سنجی با اشعه X برای خشک کردن بلوک‌های چوبی استفاده شد (شکل ۱). در این کوره، رطوبت نسبی از طریق دمای یک لایه آب در قسمت پایین کوره کنترل شده و مقاومت‌های الکتریکی، جریان هوا را در بالای کوره گرم می‌کردند. از دو فن گریز از مرکز و یک پمپ آب، جهت برقراری شرایط یکنواخت در کوره استفاده شد. بلوک‌های چوبی تحت دمای خشک ۶۰ °C و رطوبت نسبی ۷۰ درصد از رطوبت سبز تا میانگین رطوبت نهایی ۱۲ درصد خشک شدند. سرعت جریان هوای گرم در داخل کوره حدوداً برابر با ۱ متر بر ثانیه بود. تغییرات دمای خشک و دمای نقطه شبنم در شکل ۲ نشان داده شده است. مرحله گرم کردن نمونه‌ها ۱/۵ ساعت به طول انجامید. وزن نمونه‌ها به صورت خودکار با یک سلول بار (لودسل^۲) هر پنج دقیقه اندازه‌گیری و ثبت شد. در پایان عملیات خشک کردن، با استفاده از داده‌های وزن ثبت شده با سلول بار، منحنی خشک شدن (رطوبت در مقابل زمان) برای هر نمونه رسم شد.

¹ ENGREF

² Load cell

³ Calibration

⁴ Detector

⁵ Cadmium Tellure

⁶ Indium

⁷ Molybdenum

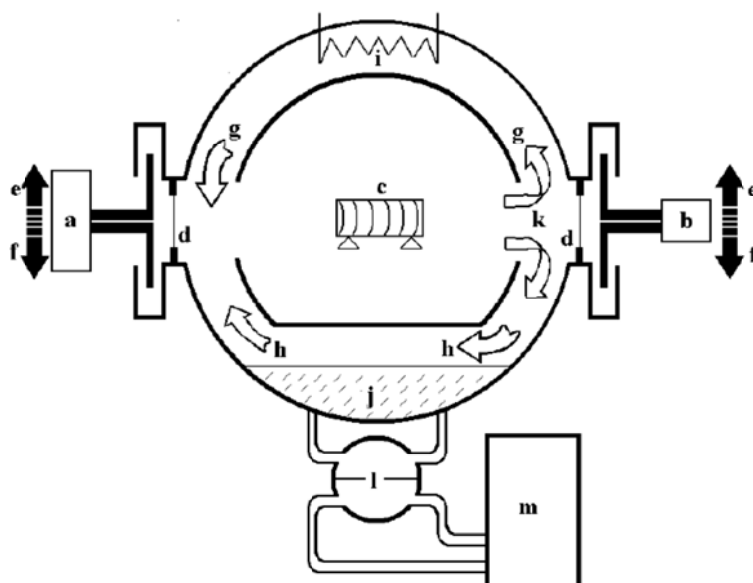
⁸ Collimator

⁹ Visual Basic

¹⁰ Scanning

¹¹ Incident beam

¹² Transmitted beam



شکل ۱- کوره چوب خشک‌کنی چند منظوره و تجهیزات طیف‌سنجی: a: منبع اشعه X، b: آشکارساز، c: نمونه چوب، d: ورقه‌های تفلون، e: حد بالای پیمایش، f: حد پایین پیمایش، g: جریان هوای خشک، h: جریان هوای مرطوب، i: گرم‌ساز برقی، j: آب، k: فن‌های گریز از مرکز، l: مبدل حرارتی، m: خنک‌کننده آب



شکل ۲- تغییرات دمای خشک و دمای نقطه شبنم کوره

پایان عملیات پیمایش، از انتهای تخته خشک‌شده، نمونه‌ای بریده شده و با برش لایه، گرادیان نهایی رطوبت تعیین می‌شود. سپس، با استفاده از این اطلاعات، گرادیان دانسیته خشک (ρ_0) در پایان عملیات، به دست می‌آید. برای هر نقطه پیمایش شده، تابع دانسیته خشک $f(\rho_0)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(\rho_0) = \int_{E_1}^{E_2} \left\{ \frac{I'(E)}{I(E)} - e^{-\rho_0 d [\mu_0(E) + \mu_w(E) MC' / 100]} \right\} dE \quad (2)$$

در این معادله: E_1 و E_2 : حد بالا و پایین انرژی طیف؛

$\frac{I'(E)}{I_0(E)}$: ضریب انتقال اندازه‌گیری شده برای چوب خشک؛

MC' : رطوبت نهایی هر لایه؛ d : پهنای تخته است. در نهایت، با استفاده از گرادیان دانسیته خشک در هر نمونه، گرادیان رطوبت در ضخامت تخته و در زمان‌های مختلف و در هر نقطه با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$g(MC) = \int_{E_1}^{E_2} \left\{ \frac{I(E)}{I_0(E)} - e^{-\rho_0 d [\mu_0(E) + \mu_w(E) MC / 100]} \right\}^2 dE \quad (3)$$

در معادله ۳، $g(MC)$: رطوبت چوب و $\frac{I(E)}{I_0(E)}$: ضریب

انتقال اندازه‌گیری شده طی عملیات خشک‌کردن در زمان معین است.

نتایج

- چوب راش

شکل‌های ۳ و ۴ الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب راش را طی خشک‌شدن نشان می‌دهند. میانگین مدت زمان خشک‌شدن بلوک‌های چوبی از رطوبت سبز (۸۲ الی ۹۱ درصد) تا رطوبت نهایی ۱۲ درصد برابر با ۱۲۴ ساعت بود. نتایج نشان داد که همکشیدگی بلوک چوبی پس از گذشت ۴ ساعت از شروع عملیات خشک‌کردن آغاز می‌شود. در این زمان، متوسط رطوبت بلوک چوبی برابر با ۷۲ درصد بود. به عبارت دیگر، شروع همکشیدگی چوب راش در میانگین رطوبت بالاتر از رطوبت نقطه اشباع فیبر (FSP) و به هنگام جریان توده‌ای آب آزاد رخ داده است.

- اندازه‌گیری گرادیان دانسیته و رطوبت بلوک‌های چوب و رسم منحنی خشک‌شدن

برای اندازه‌گیری میانگین رطوبت چوب طی خشک‌شدن و رسم منحنی خشک‌شدن، از داده‌های وزن حاصل از توزین خودکار نمونه‌ها با سلول بار استفاده شد. برای اندازه‌گیری گرادیان رطوبت، فرایند پیمایش در ۱۴ نقطه از ضخامت تخته و هر ۶۰ دقیقه انجام شد و تعداد فوتون‌های منتقل شده از هر نقطه در هر ساعت ثبت شد (جدول ۱). عملیات پیمایش به مدت ۶ تا ۷ روز بسته به مدت زمان خشک‌شدن تخته‌ها، به طول انجامید. به عبارت دیگر، بیش از ۱۴۴۰ گرادیان رطوبت در ضخامت تخته‌ها طی خشک‌شدن به دست آمد. در پایان عملیات پیمایش، بلافاصله بعد از خارج کردن بلوک‌های چوبی از کوره، نمونه کوچکی از انتهای بلوک بریده شده و با برش چندین لایه، گرادیان نهایی رطوبت تعیین شد. با استفاده از گرادیان نهایی رطوبت، گرادیان دانسیته خشک در ضخامت تخته تعیین شده و با کمک آن، گرادیان رطوبت در ضخامت تخته و در زمان‌های مختلف محاسبه شد.

روش اندازه‌گیری گرادیان رطوبت با روش طیف‌سنجی با اشعه X، براین اساس استوار است که با گسیل پرتو، دانسیته چوب که در حقیقت ترکیبی از دانسیته ماده دیوار سلولی و آب موجود در آن است، اندازه‌گیری شده و با کمک آن، به مقدار رطوبت چوب پی برده می‌شود. در هر سطح از انرژی، شدت پرتو عبورکرده از نمونه (I^e)، طبق قانون Beer-Lambert برای یک سیستم دو جزیی آب و چوب با معادله زیر بیان می‌شود (Baettig et al., 2006):

$$\ln \left(\frac{I_{ref}^e}{I^e} \right) = \frac{x_{mc} m_{wood}}{V_{mc}} (\mu_{wood}^e + mc \cdot \mu_{water}^e) \quad (1)$$

در این معادله:

e : سطح انرژی، I^e : شدت پرتو عبورکرده از نمونه، I_{ref}^e :

شدت پرتو بدون عبور از نمونه (پرتو جاری)، x_{mc} : ضخامت

نمونه چوبی در رطوبت mc ، m_{wood} : وزن چوب، V_{mc} : حجم

چوب در رطوبت mc ، μ_{water}^e : ضریب کاهش شدت^۱ اشعه در

آب و μ_{wood}^e : ضریب کاهش شدت اشعه در چوب است.

از شدت انرژی اشعه X، به هنگام عبور از چوب کاسته

می‌شود. نسبت شدت پرتو، قبل و بعد از عبور از نمونه به

دانسیته چوب بستگی دارد که رابطه مستقیمی با مقدار آب

(رطوبت) موجود در آن دارد. همان‌طور که قبلاً گفته شد در

¹ Attenuation coefficient

جدول ۱- محل پیمایش اشعه X در ۱۴ نقطه از ضخامت بلوک چوبی

نقاط پیمایش	محل پیمایش در راستای ضخامت بلوک چوبی (میلی متر)
۱	۱/۲۵
۲	۲/۵
۳	۳/۷۵
۴	۵
۵	۶/۷۵
۶	۸/۷۵
۷	۱۱/۲۵
۸	۱۳/۷۵
۹	۱۶/۲۵
۱۰	۱۸/۲۵
۱۱	۲۰
۱۲	۲۱/۲۵
۱۳	۲۲/۵
۱۴	۲۳/۷۵

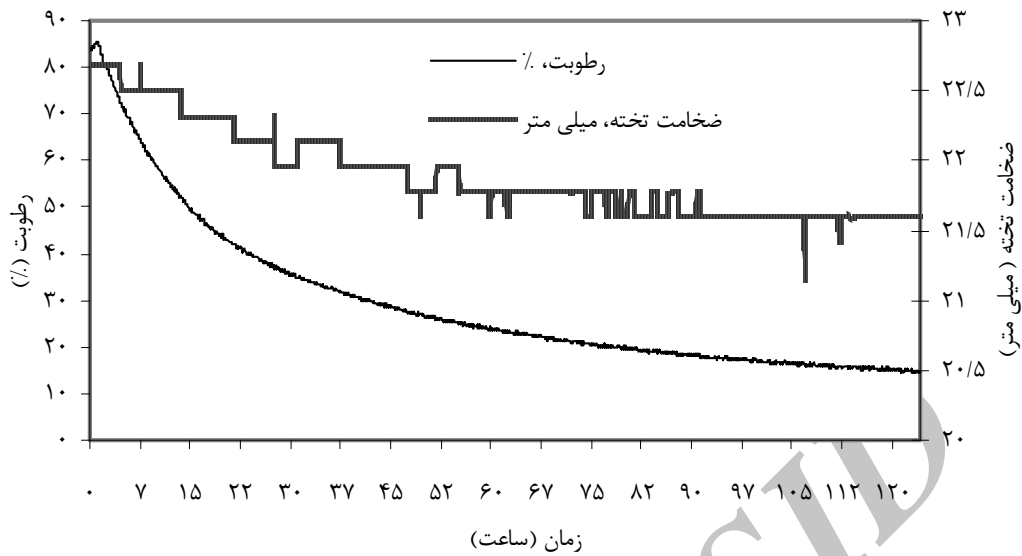
نهائی با وجود کاهش رطوبت همکشیدگی رخ نمی‌دهد.

- چوب نوئل

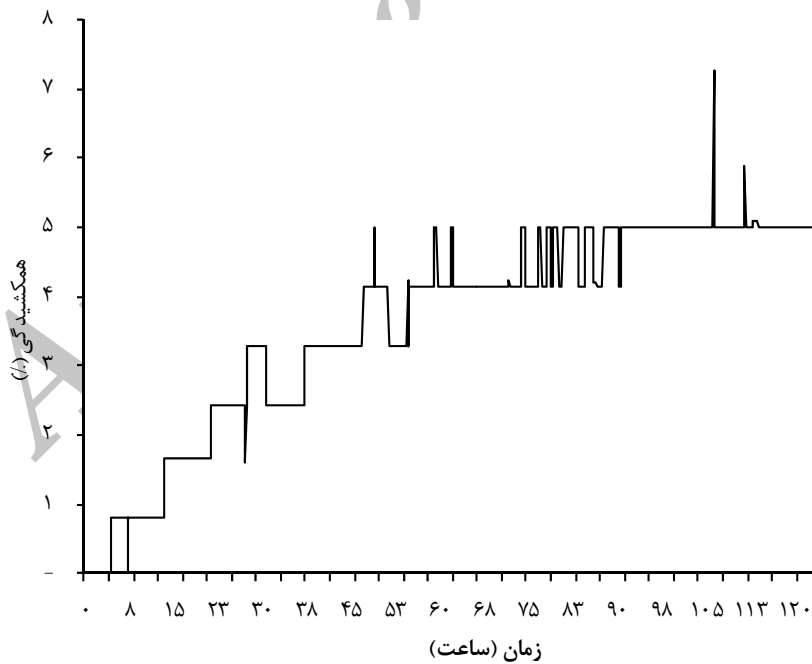
همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است میانگین رطوبت اولیه بلوک‌های چوبی نوئل قبل از خشک کردن برابر با ۱۲۵ درصد است و کاهش ضخامت بلوک‌ها در رطوبت میانگین ۲۳/۲ درصد و پس از گذشت ۲۳ ساعت از شروع عملیات چوب خشک‌کنی آغاز شد. در این میانگین رطوبت، مقدار همکشیدگی کل برابر با ۰/۸۱ درصد بود (شکل ۹).

برخلاف چوب راش که همکشیدگی آن در میانگین رطوبت بالای نقطه اشباع فیبر رخ داد، در چوب نوئل در دامنه آب آزاد و میانگین رطوبت بالای نقطه اشباع فیبر همکشیدگی رخ نداد و تغییر ضخامت بلوک محدود به دامنه هیگروسکوپیک بود. همچنین آثاری از چین خوردگی سلول‌ها در چوب نوئل مشاهده نشد (شکل ۱۰). از طرفی، برخلاف چوب راش، همکشیدگی چوب نوئل وقتی رخ داد که رطوبت سطح و مغز هر دو به کمتر از رطوبت نقطه اشباع فیبر رسید. با فرض $FSP=30\%$ ، پس از ۶ ساعت از شروع عملیات خشک کردن، رطوبت سطح در یک سمت بلوک و پس از ۹ ساعت در دو سمت آن به کمتر از نقطه اشباع فیبر کاهش پیدا کرد (شکل ۶).

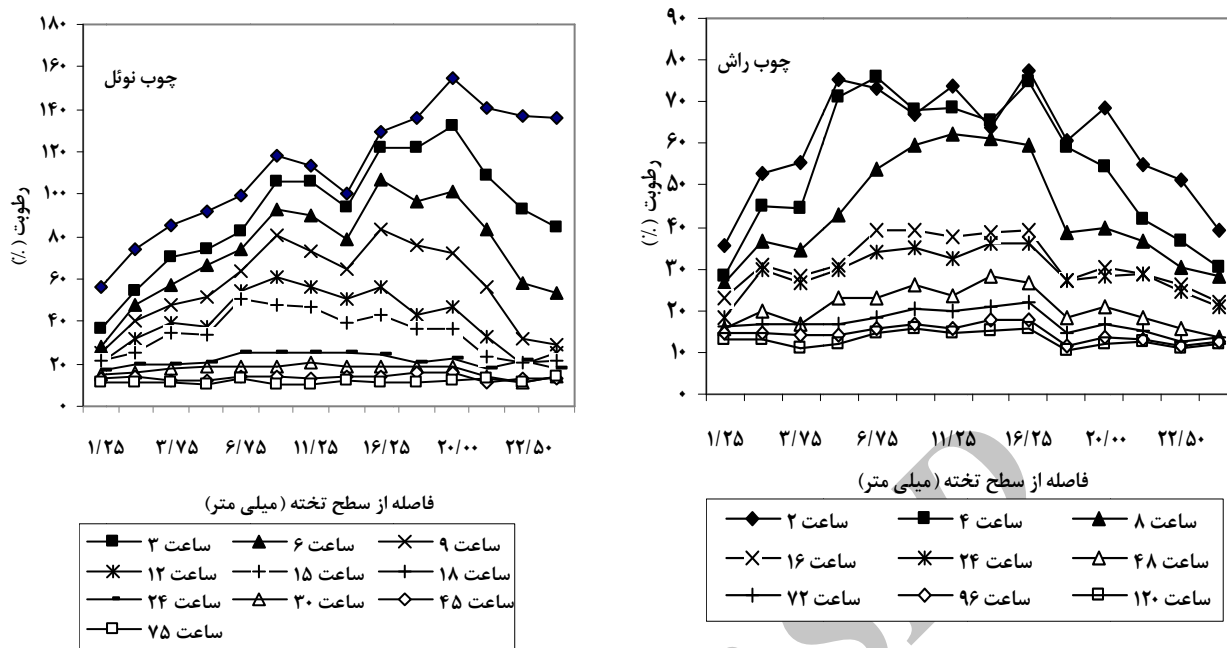
بررسی الگوی گرادیان رطوبت بلوک طی خشک شدن (شکل ۵) نشان داد که پس از ۴ ساعت از شروع عملیات خشک کردن، در هر دو سمت بلوک رطوبت سطح به زیر FSP رسیده است. به عبارت دیگر، زمان وقوع همکشیدگی چوب راش با زمان کاهش رطوبت لایه سطحی آن به کمتر از رطوبت FSP مطابقت دارد. در متوسط رطوبت ۷۲ درصد، همکشیدگی کل بلوک چوبی برابر با ۰/۸ درصد و در میانگین رطوبت ۳۰ درصد، میزان همکشیدگی کل برابر با ۳/۲۸ درصد بود. به عبارت دیگر، به طور متوسط ۶۵ درصد از کل همکشیدگی بلوک چوبی وقتی اتفاق افتاد که هنوز آب آزاد به طور کامل از چوب خارج نشده بود. حداکثر همکشیدگی بلوک چوبی در پایان عملیات خشک کردن برابر با ۵ درصد بود. بررسی الگوی دینامیکی همکشیدگی نشان می‌دهد که رابطه غیرخطی بین نرخ همکشیدگی و رطوبت میانگین چوب راش وجود دارد (شکل ۷). ضریب همکشیدگی از رطوبت سبز تا میانگین رطوبت ۳۰ درصد برابر با ۰/۰۶ و مقدار این ضریب از رطوبت ۳۰ درصد تا رطوبت نهائی ۱۴ درصد برابر با ۰/۱ بود. به عبارت دیگر، ضریب همکشیدگی در دامنه آب آغشتگی ۱/۶ برابر بیشتر از مقدار این ضریب در دامنه آب آزاد بود. بررسی دقیق الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب راش نشان می‌دهد که در دامنه هیگروسکوپیک و در رطوبت‌های نزدیک به رطوبت



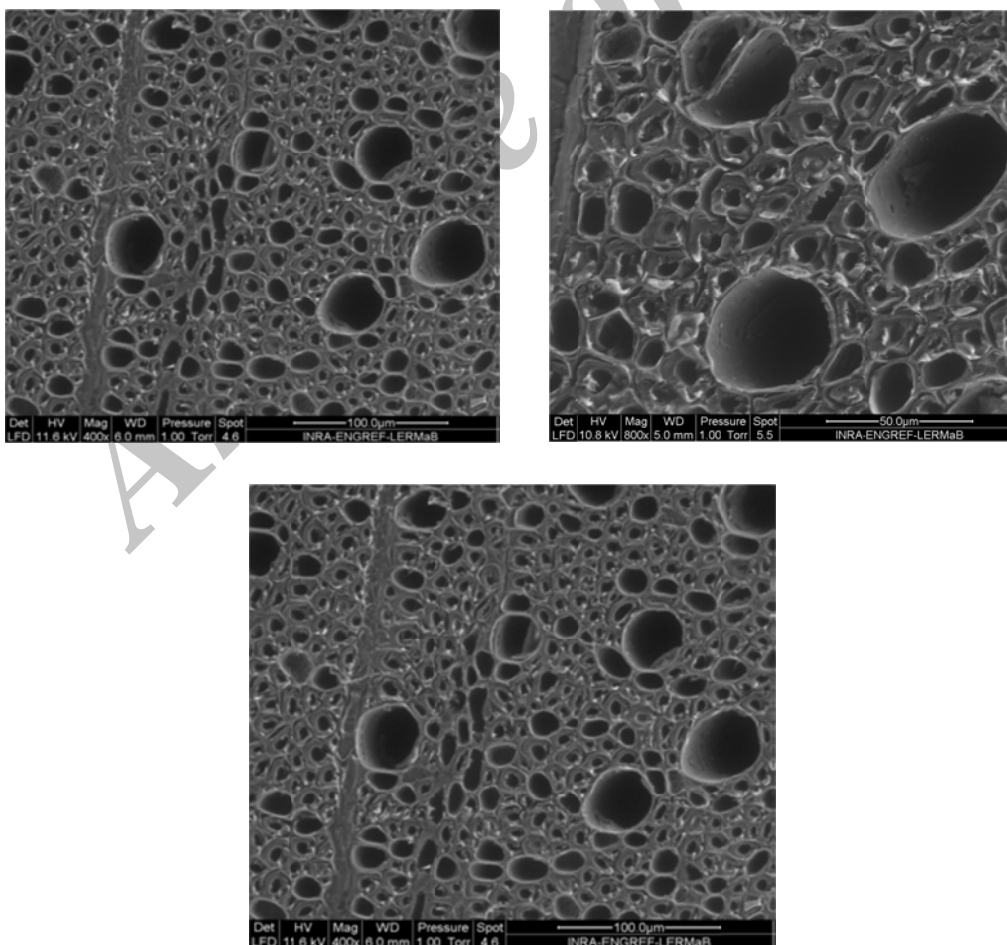
شکل ۳- الگوی تغییر ضخامت بلوک چوبی راش در مقابل منحنی خشک شدن آن



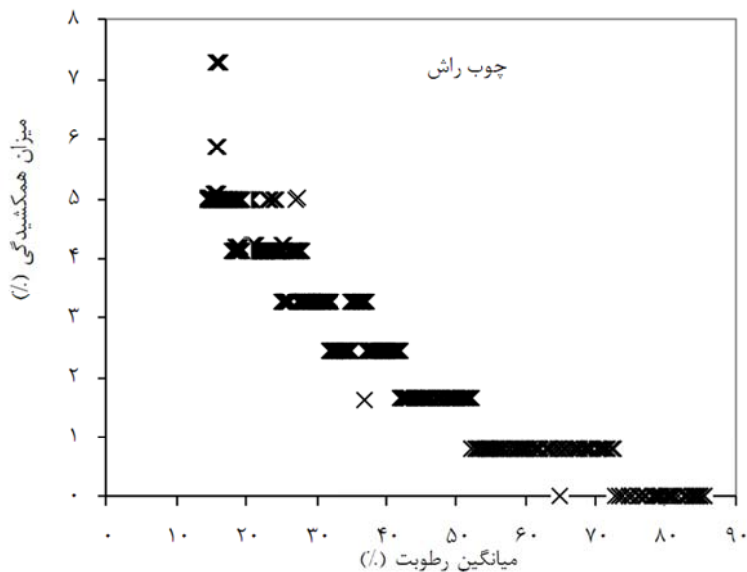
شکل ۴- الگوی همکشیدگی بلوک چوبی راش طی خشک شدن



شکل ۵- الگوی توسعه گرادیان رطوبت در ضخامت بلوک‌های چوبی نوئل و راش طی خشک شدن



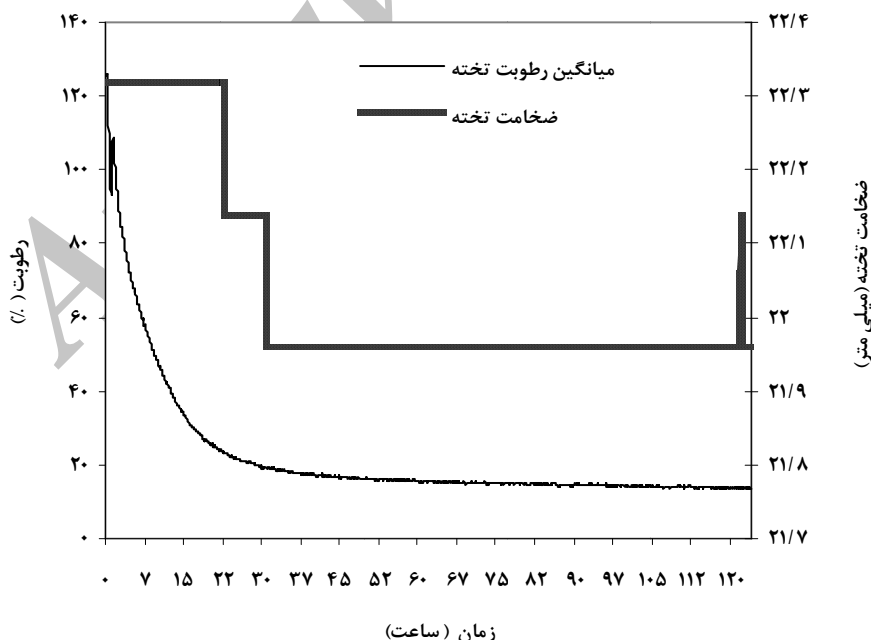
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی (ESEM) از مقطع عرضی چوب راش پس از خشک شدن



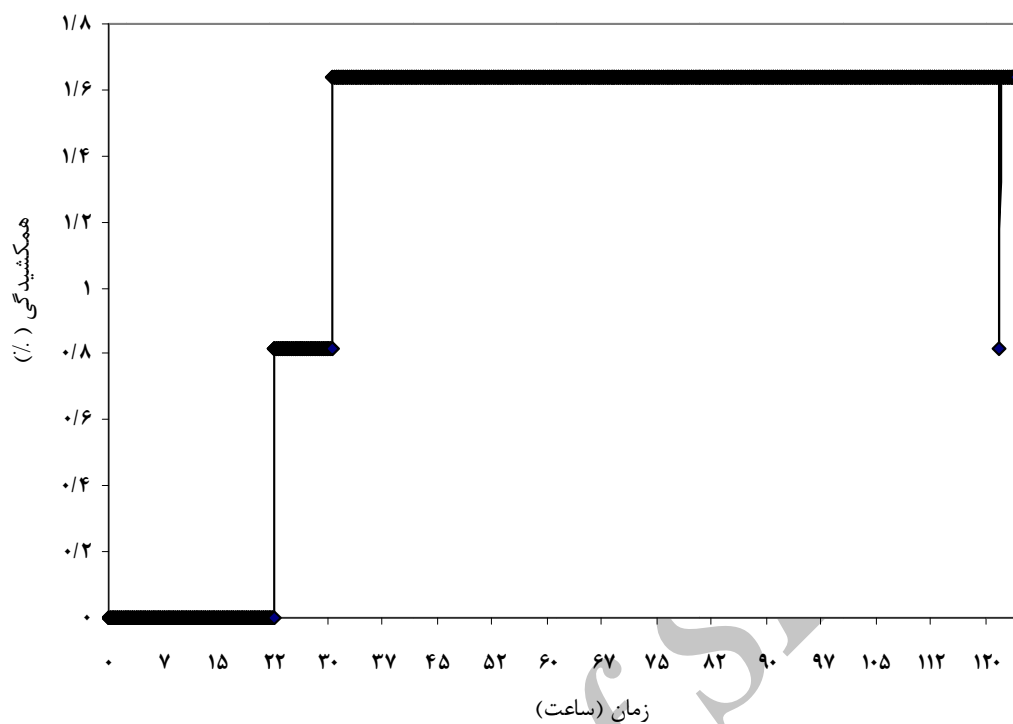
شکل ۷- تغییرات میزان همکشیدگی بلوک چوبی راش در مقابل تغییرات میانگین رطوبت آن

است. یکی از دلایل کم بودن همکشیدگی کل چوب نوئل در مقایسه با چوب راش، جرم ویژه (در رطوبت ۱۲ درصد) کمتر این چوب (۰/۳۵) در مقایسه با چوب راش (۰/۵۶) است (شکل ۱۱). همچنین، نتایج نشان داد که برخلاف چوب راش، در منحنی همکشیدگی چوب نوئل نوساناتی مشاهده نمی‌شود.

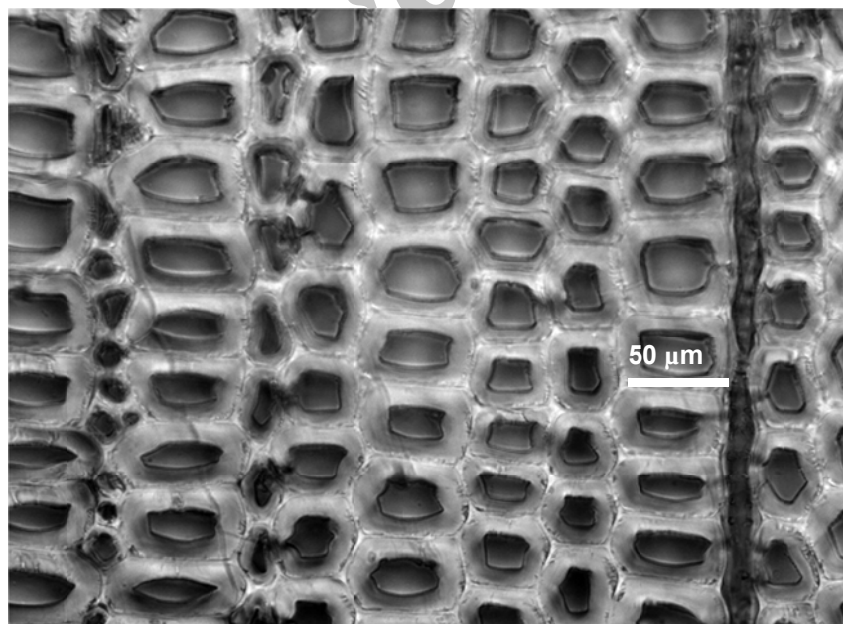
در زمان‌های ذکر شده، میانگین رطوبت مغز بلوک به ترتیب بیشتر از ۱۰۰ و ۸۰ درصد است. به عبارت دیگر، برخلاف چوب راش، همکشیدگی چوب نوئل با زمان کاهش رطوبت سطح به کمتر از FSP همخوانی ندارد. حداکثر همکشیدگی چوب نوئل در پایان عملیات خشک کردن برابر با ۱/۶۴ درصد بود که در مقایسه با چوب راش (۵ درصد) کمتر



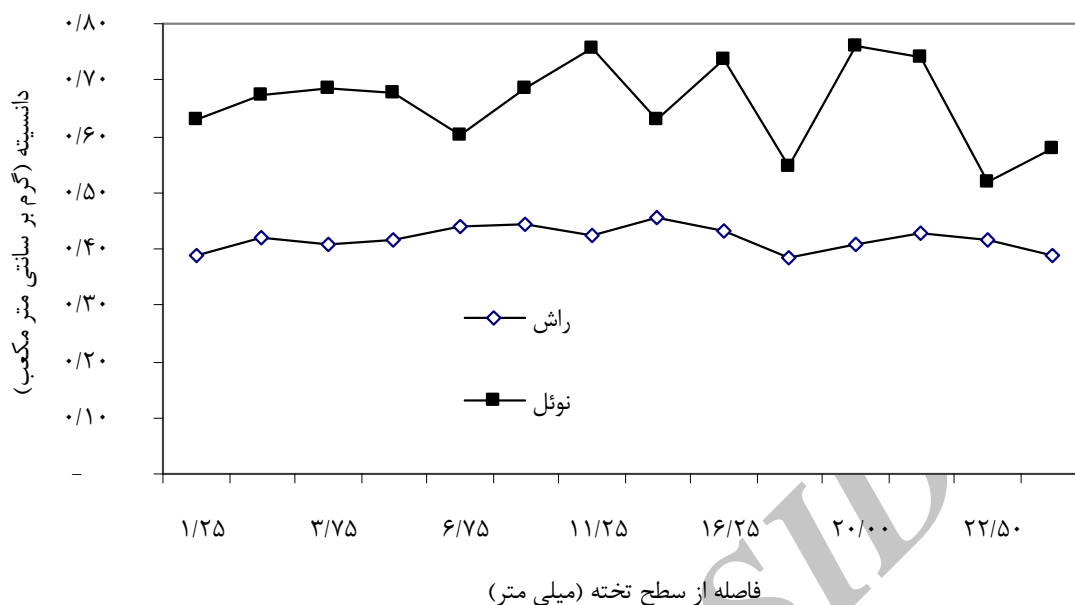
شکل ۸- الگوی تغییر ضخامت بلوک چوبی نوئل در مقابل منحنی خشک شدن آن



شکل ۹- الگوی همکشیدگی بلوک چوبی نوئل طی خشک شدن



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی چوب نوئل در پایان عملیات خشک کردن



شکل ۱۱- تغییرات دانسیته در ضخامت بلوک‌های نوئل و راش در پایان عملیات خشک‌شدن (دانسیته در میانگین رطوبت ۱۲ درصد)

بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی بررسی الگوی دینامیکی همکشیدگی چوب‌های راش و نوئل نشان داد که همکشیدگی چوب طی خشک‌شدن ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای در میانگین رطوبت بالاتر از FSP و به هنگام جریان مویبندی آب آزاد نیز رخ دهد. برخلاف چوب نوئل، در چوب راش عمده همکشیدگی وقتی اتفاق افتاد که هنوز آب آزاد به طور کامل از آن خارج نشده بود. علت تفاوت موجود بین رفتار همکشیدگی چوب نوئل و راش طی خشک‌شدن می‌تواند ناشی از سرعت متفاوت جریان مویبندی آب آزاد در این دو چوب باشد. جریان مویبندی سریع‌تر آب آزاد در چوب نوئل در مقایسه با چوب راش موجب تاخیر در کاهش رطوبت لایه سطحی آن به کمتر از FSP می‌شود. به عبارت دیگر، پوسته خشک^۱ در چوب نوئل دیرتر از چوب راش تشکیل می‌شود (Tarmian & Faezipour, 2010) و در نتیجه همکشیدگی لایه سطحی چوب نوئل دیرتر از همکشیدگی لایه سطحی چوب راش آغاز می‌شود. همکشیدگی چوب قبل از رسیدن به میانگین رطوبت FSP ممکن است دلایل متعددی داشته باشد: در صورتی که قبل از خروج کامل آب آزاد، چوب آب آغشتگی خود را از دست دهد، همکشیدگی آن قبل از رسیدن به رطوبت FSP آغاز می‌شود (Hernández and Bizon 1994).

یکی دیگر از دلایل همکشیدگی چوب در رطوبت بالاتر از FSP، تغییر شکل جزئی شکل سلول‌ها (چین‌خوردگی) طی خروج آب آزاد در اثر کشش مویبندی است. سایر محققین نیز دریافتند که همکشیدگی چوب طی خشک‌شدن شاید در دامنه رطوبت بالاتر از FSP رخ دهد (Almeida, 2008; Perré, 2007). مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های راش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (ESEM) حاکی از عدم چین‌خوردگی سلول‌ها طی خشک‌شدن بود (شکل ۶). لازم به ذکر است که در اثر وقوع چین‌خوردگی، سلول‌های چوبی به ویژه سلول‌های با دیوار نازک مانند عناصر آوندی شکل طبیعی خود را از دست می‌دهند. با توجه به این که سلول‌های چوبی راش شکل طبیعی خود را حفظ نمودند، بنابراین، همکشیدگی زودهنگام چوب راش نمی‌تواند ناشی از چین‌خوردگی سلول‌ها باشد و دلیل اصلی آن کاهش سریع رطوبت لایه‌های سطحی به رطوبت کمتر از FSP و خروج آب آغشتگی قبل از خارج شدن کامل آب آزاد است. به عبارت دیگر، گرادبان رطوبت بین لایه سطحی و مغزی بلوک‌های چوبی به سرعت توسعه یافته و لایه سطحی بلوک چوبی دچار همکشیدگی می‌شود، در حالی که هنوز رطوبت میانگین بلوک بیشتر از FSP است. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که همکشیدگی چوب در دامنه آب آزاد الزاماً نمی‌تواند ناشی از چین‌خوردگی سلول‌ها در اثر کشش مویبندی

¹ Dry shell

از طرفی دیگر شاید بتوان گفت که تنش‌های کششی توسعه یافته در چوب نوئل بر همکشیدگی کم این چوب غلبه کرده و مانع کاهش ابعاد بیشتر آن در رطوبت کمتر از ۲۰ درصد شده است.

نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر با تحقیقات Fuller (2000) و Sandland & Gjerdrum (2007) مطابقت دارد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی با اشعه X علاوه بر بررسی غیرمخرب الگوی دینامیک همکشیدگی چوب طی خشک شدن می‌توان به شدت ناهمگنی همکشیدگی آن نیز پی برد. همکشیدگی چوب نوئل در مقایسه با چوب راش از الگوی همگن‌تری برخوردار است. Perré (2007) نیز دریافت که همکشیدگی چوب نوئل در دامنهٔ آب آزاد کم است و در دامنهٔ آب آغشتگی همکشیدگی خطی رخ می‌دهد. یکی از دلایل همکشیدگی همگن‌تر چوب نوئل در مقایسه با چوب راش ممکن است ناشی از گرادیان دانسیته ویژه چوب بهاره و تابستانه در حلقه‌های سالیانه مختلف می‌باشد. در حقیقت می‌توان گفت که نوسانات موجود در الگوی دینامیک همکشیدگی چوب راش ناشی از خطای اندازه‌گیری تغییر ضخامت در اثر همکشیدگی ناهمگن چوب راش طی خشک شدن است (بلوک‌های چوبی راش در ضخامت به صورت یکنواخت همکشیده نشدند)، چون طیف‌سنجی با اشعه X بر این اساس استوار است که چوب در اثر خشک شدن به صورت همگن همکشیده می‌شود، در حالی که چوب یک ماده هرسونایکسان بوده و طی همکشیدگی نیز رفتار ناهمگنی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، هر چه شدت هرسونایکسانی چوب بیشتر باشد از دقت تکنیک طیف‌سنجی با اشعه X در اندازه‌گیری روند همکشیدگی چوب طی خشک شدن کاسته می‌شود.

ایجاد شده به هنگام خروج آب آزاد باشد. بر خلاف چوب نوئل، زمان شروع همکشیدگی در چوب راش با زمان کاهش رطوبت لایه سطحی آن به کمتر از FSP همخوانی داشت؛ در حالی که همکشیدگی چوب نوئل زمانی رخ داد که رطوبت سطح و مغز هر دو به کمتر از FSP رسید. در هر دو چوب به ویژه چوب راش، در دامنهٔ انتشار آب آغشتگی و در رطوبت‌های نزدیک به رطوبت نهائی با وجود کاهش رطوبت همکشیدگی رخ ندهد. وقوع چنین مسئله‌ای شاید ناشی از توسعه تنش‌های داخلی بیشتر در چوب راش در مقایسه با چوب نوئل باشد. وجود گرادیان رطوبت در ضخامت بلوک چوبی منجر به بروز تنش‌های داخلی شده و همین مسئله سبب می‌شود که با وجود کاهش رطوبت چوب در دامنهٔ نم‌پذیر، تغییر بعد رخ ندهد، بنابراین ممکن است بین همکشیدگی چوب و رطوبت یک رابطه خطی وجود نداشته باشد. Almeida *et al.* (2008) نیز دریافتند که بین همکشیدگی مماسی چوب راش و رطوبت در دامنهٔ رطوبتی ۲۰ تا ۴۰ درصد یک رابطه غیرخطی وجود دارد. Fuller (2000) دریافت که تغییر در میزان همکشیدگی چوب در مراحل اولیهٔ خشک کردن نمی‌تواند ناشی از تغییر میانگین رطوبت چوب و یا افزایش دمای کوره باشد بلکه تغییر در شدت تنش‌های چوب خشک‌کنی و تبدیل تنش از عوامل موثر بر تغییر میزان همکشیدگی چوب در مراحل اولیه خشک کردن است. بر اساس اظهارنظر Sandland & Gjerdrum (2007) نیز وقوع گرادیان رطوبت در تخته طی خشک شدن و در نتیجه توسعهٔ تنش‌های داخلی در آن موجب می‌شود که این تنش‌ها از وقوع تغییر بعد آزاد و مهارنشده^۱ ناشی از تغییرات رطوبت ممانعت کند. نتایج همچنین نشان داد که کل همکشیدگی چوب نوئل در بازهٔ میانگین رطوبت ۲۳ الی ۲۰ درصد رخ می‌دهد. این مسئله شاید ناشی از عدم تشکیل سریع پوسته خشک و شروع همکشیدگی لایه‌های سطحی و نیز ضریب همکشیدگی کم این چوب باشد.

¹ Free, unconstrained dimensional changes

References

- Almeida, G., Assor, C. and Perré, P. 2008. The dynamic of shrinkage/moisture content behavior determined during drying of microsamples for different kinds of wood. *Drying Technology*. 26 (9): 1118-1124.
- Baettig, R. Rémond, R. and Perré, P. 2006. Measuring moisture content profiles in a board during drying: a polychromatic x-ray system interfaced with a vacuum / pressure laboratory kiln. *Wood Science and Technology*. 4: 261-274
- Fuller, J. 2000. Determining the source of changing shrinkage rates during kiln drying. *Drying Technology*. 18 (1-2): 261-278.
- Hernández, R.E. and Bizon, M. 1994. Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber-saturation point. *Wood and Fiber Science*. 26 (3):360- 369.
- Khademi-Eslam, H. Hemmasi, A.H. Talaeipour, M. and Kiaei, M. 2010. Influence of site variation on growth rate and wood properties of *Pinus eldarica*. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 8 (2): 1058-1061.
- Kokutse, A.-D. Brancheriau, L. and Chaix, G. 2010. Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. *Annals of Forest Science*, 67 (4): 1-10
- Leonardon, M. Altaner, C.M. Vihermaa, L. and Jarvis, M.C. 2010. Wood shrinkage: Influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. *European Journal of Wood and Wood Products*. 68 (1): 87-94.
- Perré, P. 2007. Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples. *Holzforschung*. 61 (4): 419-429.
- Perré, P. and Hubber, F. 2007. Measurement of free shrinkage at the tissue level using an optical microscope with an immersion objective: Results obtained for Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and spruce (*Picea abies*). *Annals of Forest Science*. 64 (3): 255-265.
- Sakagami, H. Matsumura, J. and Oda, K. 2007. Shrinkage of tracheid cells with desorption visualized by confocal laser scanning microscopy. *IAWA Journal*. 28 (1): 29-37.
- Sandland, K.M. and Gjerdrum, P. 2007. Shrinkage, swelling and warp caused by moisture changes. In: Perré, P., *Fundamentals of Wood Drying*. A.R.B.O.L.O.R. France, pp. 85-104.
- Tarmian, A. and Faezipour, M. 2010. Tracking and simulation of dry shell formation in a wood drying process. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 1(2): 1-11.
- Taylor, A.M. Baek, S.H. Jeong, M.K. and Nix, G. 2008. Wood shrinkage prediction using NIR spectroscopy. *Wood and Fiber Science*. 40 (2): 301-307.
- Wang, E. Chen, T. Pang, S. and Karalus, A. 2008. Variation in anisotropic shrinkage of plantation-grown *pinus radiata* wood. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*. 10 (3): 243-250.
- Yi-qiang, W. Kazuo, H. Yuan, L. Masatosh, C. and Jian-ju L. 2007. Collapse-type shrinkage characteristics in plantation-grown eucalypts: I. Correlations of basic density and some structural indices with shrinkage and collapse properties. *Journal of Forestry Research*. 16 (2): 83-88.

Determination of Dynamic Shrinkage in Beech and Spruce Wood During Drying Using X-ray Spectroscopy

A. Tarmian^{1*}

¹ Associate Professor, Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I.R. Iran

(Received: 22 December 2009, Accepted: 9 May 2012)

Abstract

The dynamic of shrinkage in beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) was non-destructively determined during drying using X-ray spectroscopy. Furthermore, electron microscopy (ESEM) studies were carried out and the pattern of moisture gradient evolution was determined in order to precisely characterize the dynamic of shrinkage. The results showed that the dynamic of shrinkage is different for beech and spruce. The shrinkage of beech wood occurred during the bulk (capillary) flow of free water when the surface moisture reduced below fiber saturation point. In contrast, the shrinkage of spruce wood only occurred at the domain of bound water diffusion. The uneven pattern of shrinkage in beech wood reveals that the shrinkage of beech is more anisotropic than that of spruce. In the case of both woods, especially in beech, in spite of moisture reduction at the domain of bound water diffusion close to the final moisture, shrinkage did not occurred. Since the beech wood cells didn't suffer from collapse, it can be concluded that the considerable shrinkage of beech wood at the domain of free water can not be due to the cell collapse at a result of capillary tension.

Keywords: Drying, Shrinkage, Beech, Spruce, X-ray spectroscopy.