

## تنش‌های ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه‌ای همبُر (CLT) ساخته شده از چوب نراد تیمار گرم آبی شده

### چکیده

همانند همه فرآورده‌های مهندسی شده پایه چوب، پانل‌های لایه‌ای همبُر نیز هنگامی که در محیط مرطوب یا خشک قرار می‌گیرند؛ رطوبت را از محیط پیرامون خود جذب و یا پس دهند. در اثر این فرآیند، در فرآورده چوبی گرادیان رطوبتی ایجاد می‌شود که باعث ایجاد تنش‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت می‌گردد. در این پژوهش به بررسی تنش‌های ناشی از رطوبت و گرادیان‌های رطوبتی در پانل‌های لایه‌ای همبُر پرداخته شد. بر این اساس، نمونه‌های پانل‌های لایه‌ای همبُر پنج لایه از چوب نراد با لایه‌های رویین به صورت تک لایه و دولایه تیمار شده به روش تیمار گرم آبی چوب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. سپس پانل‌ها در معرض گام‌های رطوبتی تر به خشک کردن (از رطوبت نسبی ۸۸ به ۳۲ درصد) و خشک به تر کردن (از رطوبت نسبی ۳۲ به ۸۸ درصد) قرار گرفتند. یافته‌های بررسی نشان دادند که کاربرد لایه‌های تیمار گرم آبی شده در کاهش گرادیان رطوبتی و تنش‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت اثر دارد و تنش و گرادیان ناشی از جذب و دفع رطوبت در پانل‌ها با به کار بردن لایه‌های تیمار شده نسبت به نمونه پانل‌های شاهد کاهش می‌یابند.

**واژگان کلیدی:** پانل‌های لایه‌ای همبُر، تنش‌های ناشی از رطوبت، گرادیان رطوبتی، تیمار گرم آبی.

وحید بروشکیان<sup>۱</sup>  
بهبود محبی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

مسئول مکاتبات:  
[mohebyb@modares.ac.ir](mailto:mohebyb@modares.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

### مقدمه

پانل‌های لایه‌ای همبُر که به نام CLT<sup>۱</sup> شناخته شده - اند؛ فرآورده‌های لایه‌ای مهندسی شده‌ای از چوب ماسیو می‌باشند که لایه‌های آن به صورت عمود بر هم با زاویه ۹۰ درجه ساخته می‌شوند و توسط چسب به یکدیگر متصل می‌گردند [۱، ۲]. پانل‌های مزبور از چوب ماسیو ساخته می‌شوند و چوب ماسیو به دلیل ساختار طبیعی خود، دارای برتری‌ها و ایرادهایی می‌باشد. یکی از ایرادهای مهم و اساسی، ویژگی نم‌پذیری این فرآورده به دلیل ساختار چوبی آن است. به طوری که وقتی چوب در یک

محیط مرطوب یا خشک قرار می‌گیرد؛ می‌تواند رطوبت را از محیط پیرامون خود جذب و یا به محیط اطراف خود پس دهد. در اثر این انتقال (جذب و دفع) رطوبت، در ماده چوبی گرادیان رطوبتی ایجاد می‌شود که باعث ایجاد تنش و حتی ترک در سازه می‌گردد؛ این تنش‌ها را "تنش‌های ناشی از رطوبت"<sup>۳</sup> می‌نامند که از رفتار هم‌کشیدگی و واکشیدگی چوب ناشی می‌شود [۳؛ ۴؛ ۵؛ ۶؛ ۷]. هم‌چنین در مقیاس بزرگ این پانل‌ها در اثر تغییر آب و هوا دچار اعوجاج در دو سطح پانل و خسارت‌های سنگین و غیرقابل تصور می‌گردند [۸]. بدیهی است که این ویژگی چوب در CLT نیز بارزتر می‌گردد. رطوبت یکی از مهم‌ترین عوامل

<sup>۲</sup> Moisture induced stresses

<sup>۱</sup> Cross Laminated Timber (CLT)

می‌شود که این فرآورده نیز در صورت قرار گرفتن در شرایط بروز تنش‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت، کماکان می‌تواند در ریسک تنش‌های مزبور باشد. بر این اساس نیاز است که راه‌کارهای مناسبی برای پرهیز از این تنش‌ها یافت. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که کاربرد چوب‌های تیمارگرما‌بی شده در ساختار این پانل‌ها می‌تواند نقشی مؤثر در کاهش تنش‌ها داشته باشد. همچنین در این پژوهش به تاثیر تعداد لایه‌های چوبی تیمار گرم آبی شده در رفتار پانل‌ها و یافتن این که چوب تیمار شده می‌تواند گرادیان‌های رطوبتی و تنش‌های ناشی از رطوبت را کاهش دهد یا خیر پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

#### چوب

قطعات چوب به ابعاد (ضخامت)  $50 \times$  (عرض)  $150 \times$  (طول)  $550$  میلی‌متر از الوارهای وارداتی چوب نراد (*Abies*) *sp.* تهیه شدند.

#### تیمار گرم آبی

قطعات چوبی دارای رطوبت سبز در داخل سیلندر اصلاح چوب به روش گرم آبی و در درون سیلندر دارای آب با دمای  $150^\circ\text{C}$  با زمان ماندگاری ۳۰ دقیقه تیمار شدند. نخست قطعات تیمار شده هوا خشک شدند و سپس با استفاده از دستگاه خلأ خشک‌کن در دمای  $60^\circ\text{C}$  به مدت ۷۲ ساعت، به رطوبت کاربردی ۱۰ درصد رسانیده شد. تیمار گرم آبی و هم‌چنین خلأ خشک‌کنی به کمک دستگاه‌های تیمار گرم آبی و دستگاه خلأ خشک‌کنی ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس انجام شدند.

#### فرآیند ساخت پانل‌های لایه‌ای همبر

از الوارهای چوب نراد تیمار شده و تیمار نشده لایه‌های چوبی به ابعاد (ضخامت)  $20 \times$  (عرض)  $50 \times$  (طول)  $550$  میلی‌متر تهیه شدند؛ سپس بر اساس جدول ۱ چینش پانل انجام گردید. برای چسباندن لایه‌های چوبی از چسب دو جزئی پلی‌یورتان (ساخت شرکت مکرر، ایران) با مقدار مصرف ۲۰۰ گرم بر مترمربع در هر سطح چسب خور استفاده شد. ویژگی‌های چسب بر اساس گزارش

تاثیر گذار بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب می‌باشد و فاکتور مهم‌تر دیگری به عنوان گرادیان رطوبتی ناشی از همین رطوبت که در پانل بروز می‌کند و هنگامی نمود پیدا می‌کند که تغییرات رطوبت در درون چوب از تعادل محیط اطراف چوب خارج گردد [۲]. پژوهشی با هدف شناسایی تنش‌های ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه‌ای همبر انجام شد. در این پژوهش با به‌کارگیری چوب تیمار شده به روش حرارتی (در محیط نیتروژن) و ترکیب کردن آن با چوب اصلاح نشده، فرآورده مهندسی CLT را ساخته شد [۵]. پژوهشگران بدین نتیجه رسیدند که با افزایش دمای تیمار گرمایی در پانل‌های تیمار شده نسبت به سایر پانل‌ها مقدار کرنش پایین‌تر به دست می‌آید. هم‌چنین هر چه شدت تیمار افزایش می‌یابد؛ مقدار تنش کم‌تر می‌شود و در پژوهشی دیگر به بررسی تنش‌های ناشی از رطوبت در اثر چرخه‌های رطوبتی پانل‌های لایه‌ای همبر ساخته شده از چوب راش پرداخته شد. یافته گواه بر این بودند که تحت این چرخه بر اثر جابه‌جایی و اعمال رطوبت در نمونه‌های آزمونی تنش به وجود می‌آید و آثار آن به شکل ترک در CLT پدیدار می‌شود [۹]. با توجه با توضیحات گفته‌شده؛ تنش‌هایی که در چوب ایجاد می‌شوند؛ در اثر جذب و دفع رطوبت می‌باشند. از این رو با به‌کاربردن روش‌هایی که بتوانند جذب و دفع رطوبت را کاهش دهند؛ می‌توان از بروز گرادیان‌های رطوبتی و تنش‌های ناشی از آن کاست و از به وجود آمدن خسارت‌های سنگین تا حد امکان جلوگیری کرد. به نظر یکی از راه‌هایی که می‌توان برای این هدف در نظر گرفت؛ احتمالاً استفاده از تیمارهای اصلاح چوب از نوع گرمایی<sup>۱</sup> باشد. به طوری که در پژوهشی تیرهای لایه‌ای با استفاده از تیمار گرم آبی ساخته شدند و در معرض چرخه‌های رطوبتی تر کردن ( $50$  به  $90$  درصد) و خشک کردن ( $90$  به  $50$  درصد) قرار داده شدند [۱۰]. نتایج بررسی مزبور نشان دادند که تیمار گرم آبی منجر به کاهش گرادیان رطوبتی و تنش‌های ناشی از رطوبت در تیرها می‌گردد.



با نگاهی به ساختار پانل‌های لایه‌ای همبر و ساختار پایه چوب آن که رفتاری همانند دیگر فرآورده‌های مهندسی شده را می‌توان از آن انتظار داشت؛ پیش‌بینی

<sup>۱</sup> Thermal treatment

شرکت در جدول ۲ آورده شده است. پانل‌ها برای مدت ۲۴ ساعت زیر پرس با فشار ۱۰ بار قرار داده شدند. ابعاد نهایی پانل‌ها برابر (ضخامت) ۱۰۰×(عرض) ۵۵۰× (طول) ۵۵۰ میلی‌متر بود. برای هر تیمار ۴ تکرار در نظر گرفته شد.

جدول ۱- روش چینش پانل‌های لایه‌ای همبُر

تعداد کل لایه‌ها در CLT	تعداد لایه‌های تیمار شده	لایه‌های تیمار شده	لایه‌های تیمار نشده	ضخامت هر لایه (mm)	ضخامت نهایی (mm) CLT
۵	۲	۵-۱	۴-۳-۲	۲۰	۱۰۰
۵	۴	۵-۴-۳-۱	۳	۲۰	۱۰۰

Ply لایه

جدول ۲- ویژگی‌های چسب پلی‌یورتان بر اساس گزارش شرکت مکرر

ویژگی

رنگ	کرم
مدت زمان نگهداری در دمای ۲۵°C	۲۵ دقیقه
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۳٫۱
سختی جزء ۱	۹۵-۹۰
مقاومت گرمایی (خوب)	۲۵۰ ساعت ۷۰°C
سخت شدن کامل (خوب)	۱۵۰ ساعت ۱۰۰°C
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۲۰ تا ۳۰-
دمای کاربرد (درجه سانتی‌گراد)	۴۰-۵
مواد جامد (درصد)	۱۰۰

## آزمون‌ها

## گرادینان رطوبتی

تا دوره رطوبتی طی شود. محفظه‌ها نیز در درون اتاق کلیما قرار داده شدند. دما برابر  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد کنترل شد. برای تأمین رطوبت نسبی ۸۸ درصد از منبع رطوبت دهی استفاده شد. به رطوبت نسبی ۳۲ درصد نیز با تنظیم شرایط اتاق کلیما دست‌یافته شد. پس از شرایط دهی، نمونه‌ها از داخل محفظه‌ها بیرون آورده شدند و از خط چسب بریده شدند و نمونه‌های به ابعاد (ضخامت) ۲۰×(عرض) ۴۵×(طول) ۴۵ میلی‌متر از سرتاسر پانل‌ها تهیه شدند. و نمونه‌ها توزین شدند و سپس برای

پانل‌های لایه‌ای همبُر برای قرار دادن در معرض گام-های رطوبتی به دو گروه تقسیم شدند. برای گام رطوبتی تر کردن (رطوبت نسبی ۳۲ به ۸۸ درصد) و گام خشک کردن (رطوبت نسبی از ۸۸ به ۳۲ درصد) رسانیده شد. دوره هریک از گام‌های رطوبتی ۹۰ روز تعیین شد. برای کنترل شرایط محیطی، نمونه‌ها در درون محفظه‌هایی که از نظر دما و رطوبت نسبی تحت کنترل بودند؛ قرار گرفتند

### گرادیان کرنش آزادشده

پس از به پایان رسیدن گام رطوبتی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند و  $L_1$  تعیین و سپس نمونه‌ها از داخل محفظه‌های رطوبتی بیرون آورده و از خط چسب پانل‌ها برش داده شدند و کرنش آزادشده اندازه‌گیری شد که طول اندازه‌گیری  $L_2$  و بر اساس فرمول ۳ مقدار کرنش آزادشده تعیین گردید (۳، ۶، ۱۳).

(۳)

$\epsilon_{\text{released}} = \text{کرنش آزادشده}$ ؛  $L_1 = \text{طول قبل از برش}$   
(میلی‌متر)؛  $L_2 = \text{طول بعد از برش}$  (میلی‌متر)

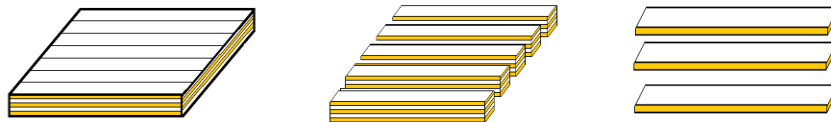
### گرادیان مقاومت خمشی

پانل‌ها به ابعاد (ضخامت)  $20 \times$  (عرض)  $45 \times$  (طول)  $450$  میلی‌متر از محل خط چسب برش داده شدند و طبق استاندارد ASTM D 143، و هر لایه برش داده شده تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه Dartec قرار گرفتند (شکل ۱). مدول الاستیسیته و خمشی با استفاده از فرمول‌های (۴) و (۵) تعیین شدند (۳، ۶، ۱۳).

(۴)

(۵)

$MOE = \text{مدول الاستیسیته ظاهری}$  ( $N/mm^2$ )؛  $L = \text{طول دهانه}$  (mm)؛  $W = \text{پهنای نمونه}$  (mm)؛  $B = \text{ضخامت نمونه}$  (mm)؛  $10\% - 40\% X = \text{جابجایی در نقاط } 10 \text{ و } 40$  درصد بار حداکثر (mm)؛  $10\% - 40\% P = \text{بار در نقاط } 10 \text{ و } 40$  درصد بار حداکثر (N)؛  $MOR = \text{مدول گسیختگی}$  ( $N/mm^2$ )؛  $P_{\text{max}} = \text{بار حداکثر}$  (N).



شکل ۱- شیوه تهیه نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

به‌جامانده محاسبه گردیدند. از آنجایی‌که تنش از حاصل‌ضرب مدول الاستیسیته در کرنش به‌جامانده می‌باشد؛ تنش با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید [۶].

مدت ۲۴ ساعت در آون به دمای  $2 \pm 10.3$  قرار داده شدند و دوباره توزین گردیدند. بر اساس معادله ۱ مقدار درصد رطوبت و گرادیان رطوبتی آنها تعیین شدند (۳، ۶، ۱۳).

(۱)

$MC = \text{مقدار رطوبت } (\%)$ ،  $M_h = \text{وزن تر نمونه‌های چوبی بعد از خروج از چمبر در گام خشک‌کردن و یا گام خیس کردن}$  (g)،  $M_o = \text{وزن خشک نمونه‌های چوبی پس از خروج از آون}$  (g)

### تنش‌های ناشی از گرادیان رطوبتی در پانل‌های

#### لایه‌ای همبر

#### گرادیان کرنش برجای‌مانده

برای تعیین گرادیان کرنش برجای‌مانده، پانل‌ها به دو گروه تقسیم شدند و یک گروه برای گام رطوبتی خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) و گروه دیگر برای گام رطوبتی تر کردن (۳۲ به ۸۸ درصد) برای ۴۵ روز در معرض رطوبت قرار داده شدند، که قبل از شروع گام‌ها، پایانه لایه‌های فرد (۱، ۳، ۵) در هر دو سو نشانه‌گذاری شدند و فاصله بین نقاط تعیین‌شده اندازه‌گیری شدند. این فاصله را  $L_0$  و سپس پانل‌ها به گام بعدی رطوبت انتقال داده شدند. سپس در پایان هر گام فاصله بین نقاط اندازه‌گیری شد. این فاصله  $L_1$  نام‌گذاری شد و در پایان با استفاده از فرمول ۲ مقدار کرنش برجای‌مانده تعیین شد (۳، ۶، ۱۳).

(۲)

$\epsilon_{\text{restrained}} = \text{کرنش باقی‌مانده}$ ؛  $L_0 = \text{طول اولیه پیش از رطوبت دهی}$  (میلی‌متر)؛  $L_1 = \text{طول پس از رطوبت دهی}$  (میلی‌متر)

### گرادیان تنش‌های ناشی از رطوبت

تنش‌های ناشی از رطوبت با استفاده از اطلاعاتی که به دست آورده شدند و با مدول الاستیسیته و کرنش

تعداد در چوب تیمار شده مربوط دانست؛ زیرا بر اساس یافته‌های پیشین در چوب‌های تیمار گرمایی شده کاهش رطوبت تعادل بر اثر تیمار گزارش شده است [۵]. از دلایل چنین رفتاری می‌توان گفت که در چوب‌های گرم آبی شده؛ همی سلولزها از پلیمرهای آب دوست چوب می‌باشند که در اثر تیمار گرم آبی، دچار تخریب حرارتی می‌شوند و به فورفورال تبدیل می‌شوند و بر اثر تیمار گرمایی نواحی کریستالی سلولز نیز بر اثر تیمار افزایش می‌یابد. هم‌زمان به سبب واکنش استری شدن؛ گروه‌های آب دوست هیدروکسیل از همی سلولز کنده شده و بین همی سلولز و لیگنین پیوندهای عرضی بازدارنده جذب آب تشکیل می‌شوند و به این ترتیب گروه‌های هیدروکسیل که باعث جذب رطوبت در چوب می‌باشند به تدریج کاهش یافته و میل به جذب رطوبت کاسته می‌شود و رطوبت تعادل چوب کاهش می‌یابد [۱۳، ۱۹، ۲۰].

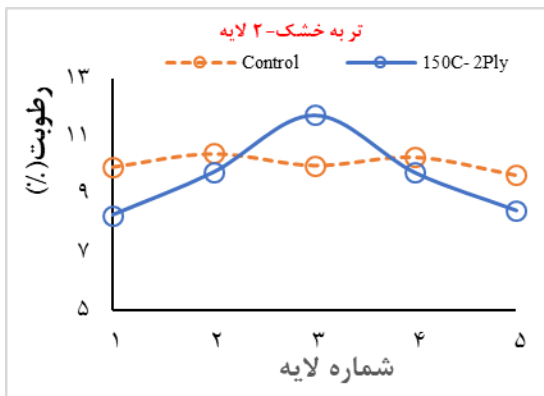
$$\sigma = \epsilon_r \times E \quad (۶)$$

$\sigma$  = تنش ناشی از رطوبت ( $N/mm^2$ )؛  $\epsilon_{restrained}$  = کرنش  
 بر جای مانده ( $mm/mm$ )؛  $E$  = مدول الاستیسیته ( $N/mm^2$ )

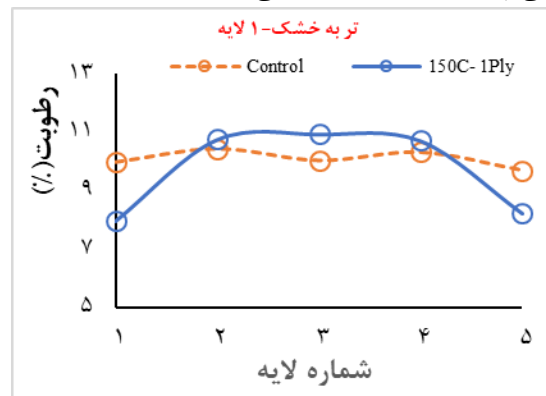
## نتایج و بحث

### گرادیان رطوبتی

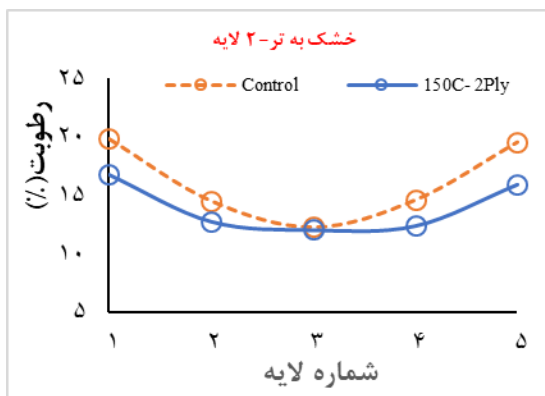
یافته‌های گرادیان رطوبتی در پانل‌های لایه‌ای همبر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. بررسی گرادیان رطوبتی در پانل‌های لایه‌ای همبر نشان داد که کاربرد یک لایه و دو لایه تیمار شده با روش گرم آبی سبب کاهش گرادیان رطوبتی در این پانل‌ها شده است. این مقدار در پانل‌های دو لایه تیمار شده نمایان‌تر بود (شکل ۲-ب؛ د). در پانل‌های شاهد مقدار گرادیان رطوبتی بیشتری بین لایه مرکزی و بیرونی دیده شد (شکل ۲-ج؛ د). کاهش گرادیان رطوبتی پانل‌های تیمار شده را می‌توان به کاهش رطوبت



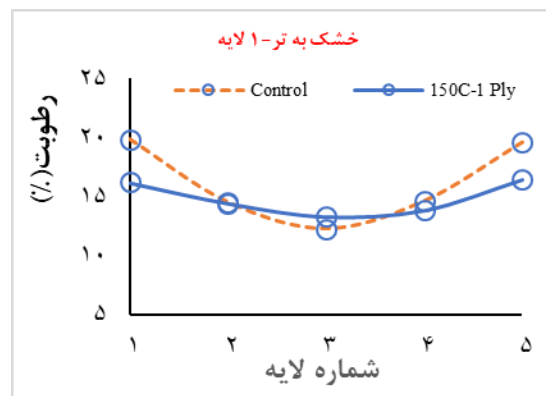
ب



الف



د



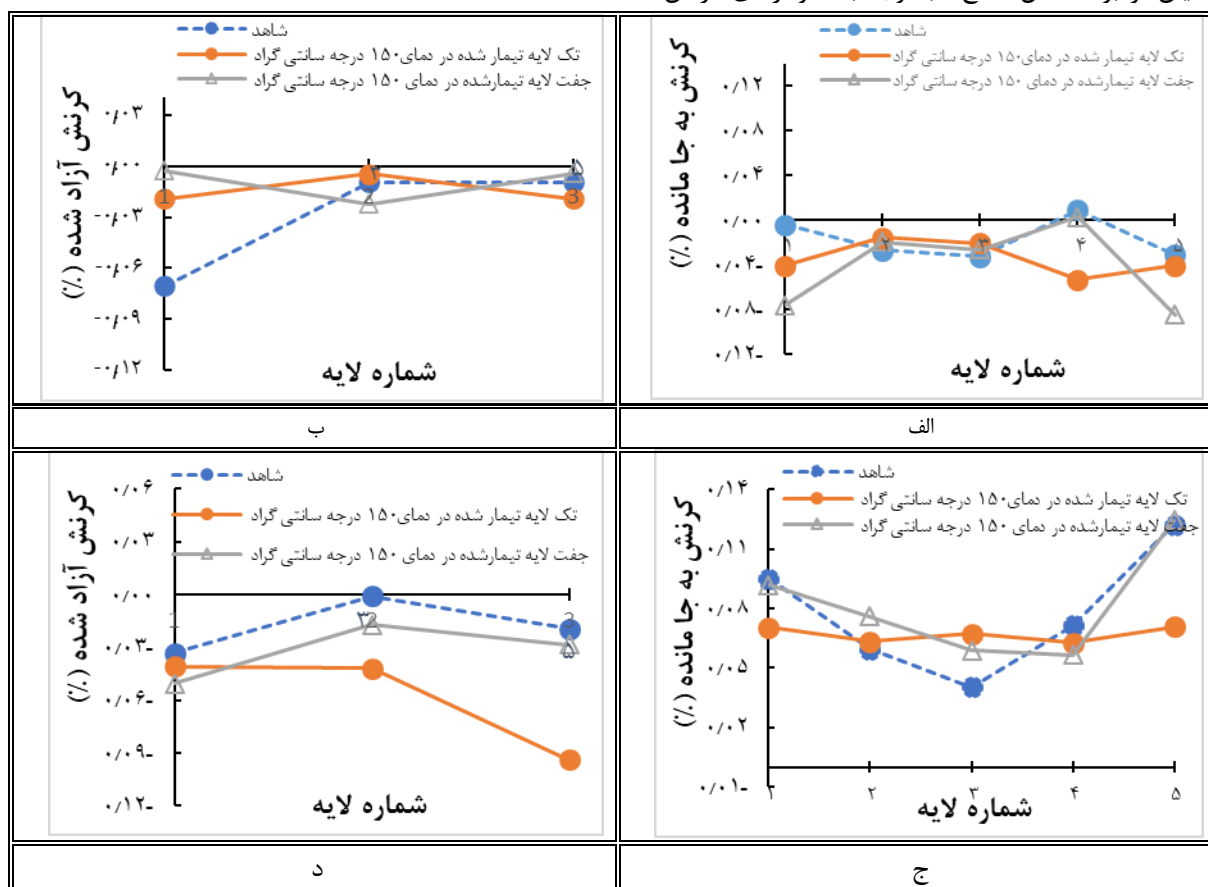
ج

شکل ۲- گرادیان رطوبتی در گام تر به خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) (الف، ب) و خشک به تر کردن (۳۲ به ۸۸) (ج، د) در پانل‌های شاهد؛ تک لایه و جفت لایه تیمار شده؛ که ۱ لایه تیمار شده بیانگر لایه‌های رویین ۱؛ ۵ و ۲ لایه تیمار شده بیانگر لایه‌های رویین ۱، ۲، ۴ و ۵ هستند؛ ۱۵۰C نشان دهنده دمای تیمار گرم آبی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

### کرنش برجای مانده و آزاد شده

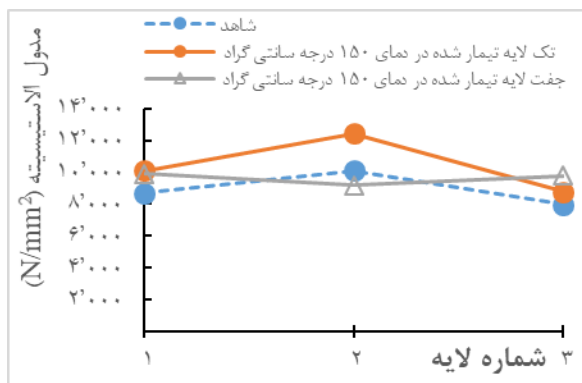
کرنش ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه‌ای همبر در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام تر به خشک کردن در پانل‌هایی که دارای لایه‌های تیمار شده بودند؛ از کرنش برجای مانده و کرنش آزاد شده کم‌تری نسبت به پانل‌های دارای لایه‌های تیمار نشده برخوردار بودند (شکل ۳-الف؛ هم چنین یافته‌ها نشان دادند که کاربرد یک لایه و یا دو لایه تیمار شده در لایه‌های بیرونی پانل‌های همبر نیز نقش کاهنده‌ای در کرنش ناشی از رطوبت داشت. در گام رطوبتی خشک به تر، پانل‌های شاهد از کرنش به جامانده بالاتری برخوردار بودند (شکل ۳-ج). در گام رطوبتی خشک به تر (یعنی از رطوبت نسبی ۳۲ به ۸۸ درصد) بروز کرنش ناشی از رطوبت شدیدتر در نمونه‌های شاهد نمایان تر بود (شکل ۲؛ ج). با توجه به نمودارهای کرنش

ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه‌ای همبر می‌توان نتیجه گرفت که تیمار گرمایی بیش‌ترین تاثیر را در کاهش کرنش ناشی از رطوبت در پانل‌های همبر دانست. از دلایل کاهش کرنش ناشی از رطوبت می‌توان به رفتار چوب تیمار شده اشاره نمود. چوب از سلولز، همی سلولز و لیگنین و مقدار کمی مواد استخراجی تشکیل شده است که این پلیمرها تاثیر زیادی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب ایفا می‌کنند. این ترکیبات شیمیایی با دما و زمان تیمار دچار تغییراتی می‌شوند؛ در بین ترکیبات مختلف موجود در چوب همی سلولز به سهولت در زمان و دمای کم‌تری نسبت به ترکیبات دیگر تجزیه می‌گردد. در نتیجه از دلایل کاهش مقدار کرنش می‌توان به تجزیه همی سلولز اشاره نمود [۱۳؛ ۱۴؛ ۱۵].



شکل ۳- کرنش به جامانده و آزاد شده در گام تر به خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) (الف، ب) و خشک به تر کردن (۳۲ به ۸۸) (ج، د) در پانل‌های شاهد؛ تک لایه و جفت لایه تیمار شده؛ که ۱ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۱؛ ۵ و ۲ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۱، ۲، ۴ و ۵

دارند؛ همان‌گونه که گرادیان رطوبتی در شکل ۲ این تغییرات را نشان می‌دهد؛ این نتایج با یافته‌های [۱۵؛ ۱۶] مطابقت داشت. در گام تر کردن مقدار مدول خمشی در لایه‌های تیمار شده نسبت به تیمار نشده افزایش یافت (شکل ۴؛ ج و د). از دلایل تغییرات در مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی می‌توان به تغییراتی اشاره نمود که در چوب اصلاح شده اتفاق می‌افتد. به‌نحوی که هنگامی که چوب در معرض حرارت زیاد قرار می‌گیرد؛ حالت شکننده - ای به خود می‌گیرد که این حالت باعث کاهش مقاومت - های مکانیکی می‌شود؛ این کاهش به دما و زمان تیمار بستگی دارد. هم‌چنین از دلایل کاهش مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی می‌توان به تجزیه حرارتی و تخریب ماده‌ی چوبی اشاره نمود [۱۵؛ ۱۳]. هم‌چنین واکنش‌هایی را که در اثر تجزیه شدن در پلیمرهای چوب اتفاق می‌افتند؛ در این تغییرات دخیل هستند [۱۱؛ ۱۷]. از سوی دیگر، می‌توان گفت که دلیل کاهش مقاومت‌های مکانیکی مربوط به تجزیه حرارتی صورت گرفته در همی‌سلولز به دلیل مقاومت دمایی کمتر نسبت به سلولز و لیگنین می‌باشد [۱۶؛ ۱۸] و کاهش مدول‌ها را نیز می‌توان به شکست دیواره سلولی در اثر دما مربوط دانست [۱۹].

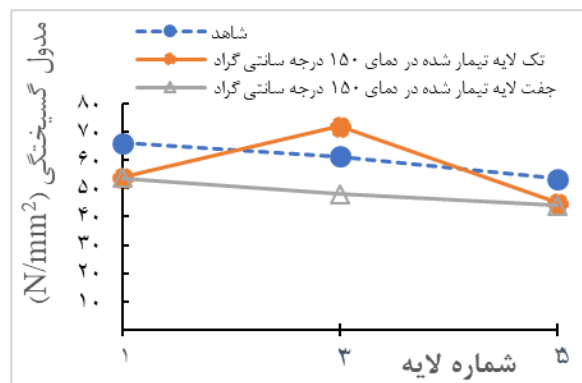


ب

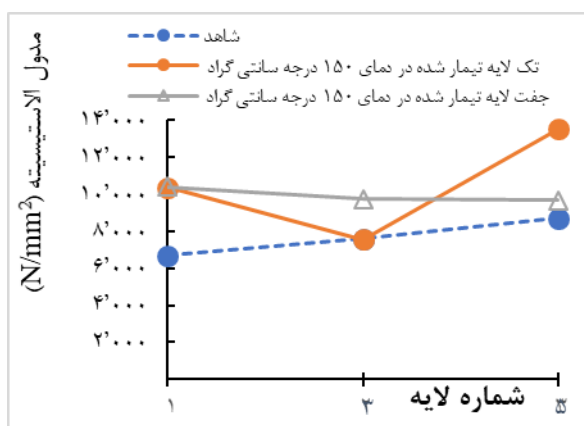
## تغییرات مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی

### در پانل‌های لایه‌ای همبُر

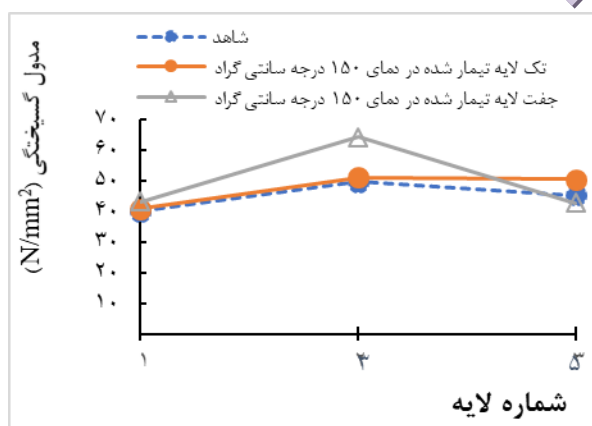
تغییرات مدول‌های الاستیسیته و گسیختگی در پانل - های لایه‌ای همبُر برای دو گام رطوبتی خشک به تر (از رطوبت نسبی ۳۲ به ۸۸ درصد) و تر به خشک (از رطوبت نسبی ۸۸ به ۳۲ درصد) در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. بررسی تغییرات مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بین پانل‌های لایه‌ای همبُر شاهد و تیمار شده نشان داد که تیمار گرم آبی بر میزان تغییرات مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی اثرگذار بود (شکل ۴- الف؛ ب). به‌نحوی که بعد از گام تر به خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) مقدار مدول گسیختگی در لایه‌های تیمار شده مقداری کاهش یافت (شکل ۴؛ الف) و مقدار مدول الاستیسیته در لایه‌های تیمار شده بیش از لایه‌های تیمار نشده بود (شکل ۴؛ ب). از طرفی دیده شد که لایه‌های تیمار شده باعث کنترل تغییرات مدول گسیختگی در لایه - های داخلی نیز شده است (شکل ۴؛ الف و ب). به‌نحوی که مقدار مدول گسیختگی پس از پایان گام رطوبتی در لایه - های میانی افتی نداشته است. این نکته می‌تواند ناشی از به کار بردن لایه‌های تیمار شده باشد؛ زیرا لایه‌های تیمار شده اثر کاهنده‌ای در جذب رطوبت لایه‌های پانل



الف



د



ج

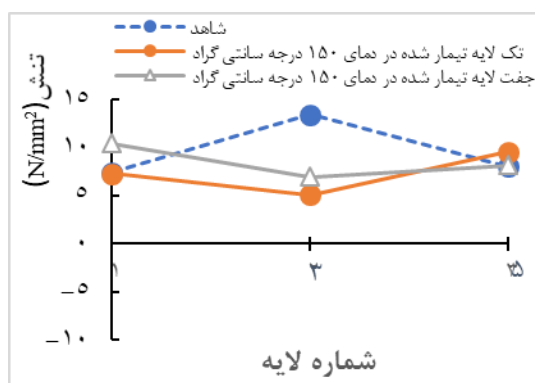
شکل ۴- مدول الاستیسیته و گسیختگی در گام تر به خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) (الف، ب) و خشک به تر کردن (۳۲ به ۸۸) (ج، د) در پانل‌های شاهد؛ تک لایه و جفت لایه تیمار شده؛ که ۱ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۵؛ ۲ و ۱ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۴، ۲، ۱ و ۵

آبی شده در ساختار یک پانل که منجر به کاهش گراد یان رطوبتی شده است اشاره نمود. زیرا با توجه به تغییراتی که در چوب تیمار گرم آبی شده به وجود می‌آید؛ چوب دارای رطوبت کم‌تری می‌شود و در هنگامی که در معرض شرایط مختلف اقلیمی قرار می‌گیرد؛ ثبات ابعادی بیشتری از خود نشان می‌دهد. در گام تر به خشک کردن نیز مشاهده می‌گردد که از گراد یان تنش کاسته می‌شود و تنش نیز قدری منفی می‌گردد (شکل ۴-الف). در پانل‌های جفت لایه تیمار شده تغییر تنش در حد صفر می‌باشد (شکل ۴، الف). این نکته در پانل‌های جفت لایه تیمار شده نمود بیشتری نسبت به پانل‌های تک لایه دارد (شکل ۴-الف). عدم تغییر تنش در پانل‌ها با گراد یان رطوبت رابطه دارد (شکل ۳ مربوط به گراد یان رطوبتی). در اثر دفع رطوبت در پانل‌ها هم‌کشیدگی روی می‌دهد که این مقدار در نمونه پانل‌های تیمار شده در مقایسه با پانل‌های شاهد کمتر می‌باشد (شکل ۳). از دلایل کاهش رطوبت می‌توان به کاربرد چوب تیمار شده اشاره نمود به طوری که گزارش‌های پیشین نیز با به کاربرد چوب تیمار شده توانستند مقدار تنش ناشی از رطوبت را کاهش دهند [۵؛ ۱۳].

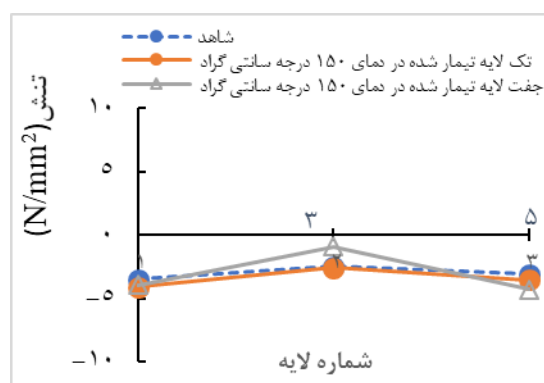
#### تنش‌های ناشی از گراد یان رطوبتی

تنش‌های ناشی از رطوبت در نمونه پانل‌های شاهد، تک لایه و دولایه تیمار شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی - گراد در گام‌های تر به خشک کردن و خشک به تر کردن در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که در گام تر به خشک کردن گراد یان تنش زیادی در نمونه پانل‌های تک لایه و دولایه تیمار شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد وجود ندارد (شکل ۴-الف) و تنش ناشی از رطوبت از گام خشک به تر در نمونه پانل شاهد در مقایسه با تنش در نمونه‌های تک لایه و دولایه تیمار شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد در گام خشک به تر کردن بیشتر می‌باشد (شکل ۴-ب). تنش در لایه میانی نسبت به لایه‌های بیرونی پایینی لایه‌های ۱ و ۵ در پانل شاهد بیشتر است (شکل ۴-ب)؛ در حالی که در پانل‌های تیمار شده، در گام رطوبت‌تر به خشک کردن این اختلاف یا ناچیز است یا این که تنش در لایه سوم که تیمار نشده نیز می‌باشد (شکل ۴-الف)؛ کمتر از لایه‌های ۱ و ۵ است. از دلایل کاهش تنش‌های ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه - ای همبر می‌توان گفت که به کاربرد چوب تیمار گرم





ب



الف

شکل ۵- تنش‌های ناشی از رطوبت در گام تر به خشک کردن (۸۸ به ۳۲ درصد) (الف) و خشک به تر کردن (۳۲ به ۸۸) (ب) در پانل‌های شاهد؛ تک لایه و جفت لایه تیمار شده؛ که ۱ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۱؛ ۵ و ۲ لایه تیمار شده بیانگر لایه ۱، ۲، ۴ و ۵

این لایه‌های تیمار شد در هر دو سطح پانل، گرادیان رطوبتی کاهش می‌یابد. پیرو کاهش گرادیان رطوبتی، تنش‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت نیز کاهش پیدا می‌کند. هم چنین بر اثر وجود لایه‌های تیمار گرم آبی شده کرنش ناشی از رطوبت در پانل‌های لایه‌های همبر نیز کاهش می‌یابد. به دلیل وجود این لایه‌ها، اختلاف مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بین لایه میانی و بیرونی نیز کاسته می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای کنترل تنش‌های ناشی از جذب و دفع رطوبت در پانل‌های لایه‌ای همبر که ساختار چوب ماسیو را دارد؛ از لایه‌های چوب تیمار گرم آبی شده به صورت تک لایه و دولایه در دو سطح پانل استفاده شد. بر این اساس که تیمار گرم آبی سبب کاهش جذب و دفع چوب و ثبات ابعاد آن می‌گردد. یافته‌های این بررسی کارآمدی به‌کارگیری لایه‌های تیمار شده را در کاهش گرادیان رطوبتی نشان داد. هم چنین بر اثر به‌کارگیری

### منابع

- [1] Karacabeyli E. and Douglas B., 2013. CLT Hand book, 1 Edition, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Binational Softwood Lumber Council (BSLC), FPInnovation (Institute), 572p.
- [2] Rostampour Haftkhani, A., Ahmadi, M., Moezipour, B. and Hajjalizadeh, F., 2022. The effect of strengthening of the cross-laminated timber using glass fiber reinforced polymer on the lateral performance of the single shear lap joints, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, Vol. 13, No. 1.(In Persian).
- [3] Angst V. and Malo K. A., 2012. Moisture-induced stresses in glulam cross sections during wetting exposures, Wood Sci Technol, 47 (2): 227-241.
- [4] Mohebbi B. and Broushakian V., 2022. Moisture-induced stresses in cross laminated timber (CLT) made from hydrothermally modified wood. European Journal of Wood and Wood Products, 43
- [5] Fragiaco, M., Fortino, S., Tononi, D., Usardi, I. and Toratti, T., 2011. Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to different climates. ENG STRUCT 32 (11): 3071-3078.
- [6] Gereke T., Schnider T., Hurst A. and Niemz P. 2009. Identification of moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels from beech wood (*Fagus sylvatica* L), Wood Sci Technol, 43 (3): 301-315.

- [7] Jönsson J. H., 2005. Internal stresses in glulam due to moisture gradients in the grain direction. *Holzforschung*, 59 (1): 18-22.
- [8] Jönsson J. and Thelandersson S., 2003. The effect of moisture gradients on tensile strength perpendicular to grain in glulam, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61 (5): 342-348.
- [9] Hassani M. M., Wittel F. K., Ammann S., Niemz P. and Herrmann H. J., 2015. Moisture-induced damage evolution in laminated beech, *Wood Science and Technology*, 50 (5): 917-940.
- [10] Häglund M. 2008. Varying moisture content and eigen-stresses in timber elements, *Wood Material Science and Engineering*, 3 (2): 38-45.
- [11] Hassani M. M., Wittel F. K., Ammann S., Niemz P. and Herrmann H. J., 2015. Moisture-induced damage evolution in laminated beech, *Wood Science and Technology*, 50 (5): 917-940.
- [12] Bekhta P. and Niemz P., 2003. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood, *Holzforschung*, 57 (5): 539-546.
- [13] Mirzaei G., Mohebbi B. and Ebrahimi G., 2017. Glulam beam made from hydrothermally treated poplar wood with reduced moisture induced stresses, *CONSTR BUILD MATER*, 135: 386-393.
- [14] Esteves B., Domingos I. and Pereira H., 2008. Pine wood modification by heat treatment in air, *BIORESOURCES*, 3 (1): 142-154.
- [15] Korkut D. S. and Guller B., 2008. The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri Medw*) wood, *BIORESOURCE TECHNOL*, 99 (8): 2846-2851.
- [16] Esteves B. and Pereira H., 2008. Wood modification by heat treatment: A review, *BIORESOURCES*, 4 (1): 370-404.
- [17] Aksoy A., Deveci M., Baysal E. and Toker H., 2011. Color and gloss changes of Scots pine after heat modification, *Wood Research*, 56 (3): 329-326.
- [18] Percin O., Peker H. and Atilgan A., 2016. The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. *Wood Research*, 61 (3): 443-456.
- [19] Köll H. S., 2010. Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing, *J ENVIRON BIOL* 31 (6): 1007-1011.
- [20] Hajihassani, R., Mohebbi, B. and Kazemi Najafi, S., 2020. The Effect of hygro-thermo-mechanical modification on the applied properties of glulam made from poplar, *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 11, No. 2. (In Persian).

## Moisture induced stresses in cross laminated timbers (CLT) made from hydrothermally modified fir wood

### Abstract

Cross-Laminated-Timbers (CLT) absorb/desorb moisture from surrounding atmosphere when exposed to wet/dry conditions; such all engineering massive wood-based products. The moisture gradient occurs due to this process, which is responsible for moisture induced stresses. In the current research work, the moisture induced stresses due to the moisture gradient have been studied in the CLT. The sample panels were made with 5-plys. One and two plys of hydrothermally treated wood at 150°C were placed on both sides as surface layers. Afterwards, the sample panels were exposed to wet to dry cycles (RH of 88 to 32%) and dry to wet cycles (RH of 32 to 88%). Results revealed that the moisture gradient as well as the moisture induced stresses are reduced due to application of the hydrothermally treated laminations on both side of the panels in comparison with control samples.

**Keywords:** Cross Laminated Timber, Moisture induced stresses, Moisture gradient.

**V. Broushakian<sup>1</sup>**  
**B. Mohebbi<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Vahid Broushakian, M.Sc. graduate students, Department of wood and paper science, University of Tarbiat Modares, Noor, Iran

<sup>2</sup> Associate Prof., Department of wood and paper science, University of Tarbiat Modares, Noor, Iran

Corresponding author:  
[mohebbib@modares.ac.ir](mailto:mohebbib@modares.ac.ir)

Received: 2022/08/31  
Accepted: 2023/02/17