

## بررسی ویژگی‌های مکانیکی چوب پلیمر راش - فورفوریل الکل

### چکیده

در این تحقیق ویژگی‌های مکانیکی چوب پلیمر راش (راش - فورفوریل الکل) بررسی شده است. در این راستا، این ویژگی‌های در آزمون‌هایی با ۳ میزان متفاوت فورفوریل‌اسیون در سطح ۲۰٪، ۳۰٪ و ۶۵٪ مقایسه آنها با آزمون‌های شاهد ارزیابی شده‌اند. فورفوریل‌اسیون آزمون‌ها با اشباع به روش سلول پر و پلیمریزاسیون منومر فورفوریل الکل با کاتالیزور حرارت، انجام شده است. آزمون‌ها با پیروی از آئین نامه ASTM D-143 در آزمون‌های خمش استاتیکی، کشش عمود بر الیاف، فشار عمود و موازی الیاف، برش موازی الیاف و سختی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان فورفوریل‌اسیون شاخص‌های مقاومت خمشی استاتیکی آزمون‌ها افزایش و مقاومت کشش عمود بر الیاف کاهش پیدا می‌کنند. به علاوه، فشار عمود بر الیاف و برش موازی الیاف در آزمون‌هایی با میزان فورفوریل‌اسیون زیاد، نسبت به آزمون‌های شاهد افزایش نشان داده‌اند. سختی سطح شعاعی این آزمون‌های چوب پلیمر نسبت به آزمون‌های شاهد افزایش زیادی پیدا کرده‌اند و بر حسب میزان فورفوریل‌اسیون افزایش سختی سیر صعودی داشته است.

**واژگان کلیدی:** فورفوریل‌اسیون، خمش استاتیکی، مقاومت برش موازی الیاف، مقاومت کشش عمود و موازی الیاف

حمیده عبدالزاده<sup>۱\*</sup>  
قنبر ابراهیمی<sup>۲</sup>  
محمد لایقی<sup>۳</sup>  
مهدي قاسمیه<sup>۴</sup>  
سید احمد میرشکرایی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، <sup>۲</sup> استاد و <sup>۳</sup> استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار دانشکده عمران دانشگاه تهران، ایران

<sup>۵</sup> استاد دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:  
h\_abdolzadeh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۱۸

### مقدمه

در دهه‌های اخیر تحقیق در زمینه بهبود ویژگی‌های چوب با کمک مواد شیمیایی گوناگون (حفاظت چوب، چوب پلیمر و غیره) یکی از زمینه‌های بسیار مهم در تحقیقات این صنعت به شمار آمده است. در فرایندهای تولید چوب پلیمر مانند فورفوریل‌اسیون، بر خلاف استیل‌اسیون که به تجهیزات ویژه‌ای برای اصلاح نیاز دارد چوب از طریق تجهیزات سنتی با منومر مورد نظر اشباع شده و به دنبال آن فرایند پلیمریزاسیون با روش‌های

مختلفی مانند حرارت‌دهی، استفاده از کاتالیزور و یا نفوذ اشعه تکمیل می‌شود.

فورفوریل‌اسیون چوب ممکن است آینده امید بخشی داشته باشد زیرا قیمت فورفوریل الکل ممکن است در آینده نزدیک به خاطر اینکه این ماده محصول جانبی تولیدات زیست فناوری است، کاهش یابد. هدف از تیمار فورفوریل‌اسیون افزایش ثبات و پایداری چوب و افزایش برخی ویژگی‌های مکانیکی آن بدون کاهش قابل ملاحظه - ای در ویژگی‌های مکانیکی دیگر مورد نیاز برای

می‌توانند بر طیف به نسبت گسترده‌ای از ویژگی‌های چوب تاثیر بگذارند.

در فورفوریل‌اسیون سطوح تیمار بر پایه قرارداد با درصد وزن جذب شده ( $WPG^2$ ) بیان می‌شود. با رقیق سازی مناسب محلول اشباع، امکان به دست آوردن  $WPG$  در دامنه‌ای از ۱۰ تا بیش از ۱۰۰٪ برای چوب‌های با چگالی کم وجود دارد. در واقع غلظت  $FA^3$  و چگالی چوب، میزان  $WPG$  را تحت تاثیر قرار می‌دهند. چوب‌هایی با چگالی کم، حجم فضاها خالی به نسبت بزرگتری داشته و در نتیجه درصد وزن جذب شده بیشتری در مقایسه با چوب متراکم‌تر (دارای دانسیته بیشتر) خواهند داشت.

Lande و همکاران (۲۰۰۴) بر این باورند پایداری ابعادی چوب فورفوریل‌دار شده با افزایش  $WPG$  زیادت می‌شود [۱۰]. Epmeier و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات خود به این نتایج رسیده‌اند که با افزایش ضریب واكشیدگی، میزان رطوبت تعادل و کرنش واكشیدگی فرآورده ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین در اثر پلیمریزاسیون  $FA$  در چوب تغییرات معنی‌داری در  $MOE^4$  دینامیکی دیده نشده است [۱۱]. Lande و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق دیگری با مقایسه  $WPG$  و  $FAP$  اشاره کرده‌اند با وجود اینکه  $WPG$  روش متداولی برای نشان دادن میزان پلیمر در چوب اصلاح شده است، ولی غلظت ماده تثبیت شده (معادل با  $FAP$ ٪) بیش از جرم اضافه شده به اجزای سازنده (معادل  $WPG$ ) است. دامنه  $FAP$  از ۰ تا ۱۰۰٪ است در حالی که  $WPG$  می‌تواند دامنه‌ای از صفر تا بینهایت را شامل شود و با غلظت پلیمر در نمونه‌ها همبستگی نخواهد داشت [۱۲].

تحقیقات اولیه در زمینه فورفوریل الکل ( $FA$ ) نشان داده‌اند که رزین  $FA$  همچون رزین فنل فرمالدئید (رزین‌های  $PF$ )، رزین مناسبی برای چسباندن و ساخت چندسازه‌های زیستی است. در دهه ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ فرایندهای مختلف در زمینه کاغذهای لایه‌ای، چرخ‌های آسیاب<sup>۶</sup> و کاغذها با اجزای غیرآلی مانند کاربرد سیلیکون

کاربردهای سازه‌ای است [۱].

تحقیقات در رابطه با اصلاح چوب با فورفوریل الکل با عنوان فورفوریل‌اسیون چوب توسط استم، پیشگام اصلاح چوب، در اوایل دهه ۱۹۵۰ آغاز شده است. علاوه بر تجربه استم تلاش‌های اولیه دیگری هم در زمینه فورفوریل‌اسیون چوب توسط گولدشتاین انجام شده است [۲-۴]. فورفوریل الکل ماده شیمیایی تجدید شونده و از مشتقات فورفورال است که از هیدرولیز پسماند زیست توده<sup>۱</sup> تولید می‌شود. فرایندهای نو فورفوریل‌اسیون بر پایه سازوکارهای کاتالیزوری و مواد افزودنی فرایندی جدید، پایه‌گذاری شده‌اند. فرایند Goldstein با کاتالیزور کلرید روی و بر روی روکش‌های چوبی انجام گرفته است. وی گزارش داده که تیمار با محلول فورفوریل الکل ۹۰٪، باعث پایداری ابعادی فرآورده شده و پایداری در برابر قارچ و باز و اسید را افزایش می‌دهد. این تحقیق به تولید چوب فورفوریل‌دار شده در ابعاد کوچک در دهه ۱۹۶۰ توسط شرکت Koppers انجامیده است.

Anaya و همکاران (۱۹۸۴) و Anaya (۱۹۸۷)، فرایند بسیار نزدیکی به روش Stamm/Goldstein ارائه دادند [۵ و ۶]، اما این فرایند هرگز صنعتی نشده است. مشکل اصلی این فرایند در استفاده از کلرید روی بود که باعث شکستن زنجیره سلولز شده و باعث کاهش مقاومت چوب اصلاح شده می‌شود.

Westin و Schneider به‌طور جداگانه، و تقریباً به طور همزمان در اوایل دهه ۱۹۹۰ کاتالیزورهای دیگری برای فرایند فورفوریل‌اسیون ارائه داده‌اند. هر دو روش بر پایه فرایند همانند پلیمریزاسیون با روش شیمیایی و با استفاده از انیدریدهای کربوکسیلیک حلقوی به عنوان کاتالیزور بود [۷-۹]. این روندهای جدید منتهی به محلولی شد که از نظر شیمیایی در دمای اتاق ثبات داشته و با توجه به فرایند اشباع، ویژگی‌های خوبی به دست می‌داد. در نتیجه فرآورده‌های نهایی چوب فورفوریل‌دار کیفیت بالای مورد انتظار را فراهم کردند. ویژگی‌های چوب فورفوریل‌دار شده با این روش به‌طور کلی از روش اولیه‌ای که توسط Stamm و Goldstrin ارائه شده بود، بهتر بود.

در مرحله اصلاح شیمیایی، مواد شیمیایی با نسبت‌های مختلفی با یک و یا هر سه جزء عمده چوب (سلولز، همی سلولز و لیگنین) واکنش می‌دهند. این مواد

<sup>1</sup> Biomass

<sup>2</sup> Weight Percentage Gain

<sup>3</sup> Furfuryl Alcohol

<sup>4</sup> Modulus of Elasticity

<sup>5</sup> Furfuryl Alcohol Polymerization

<sup>6</sup> Grinding wheels

ساعت در دمای ۱۰۶ درجه سلسیوس در درون آون انجام شده است.

مرحله پخت تکمیلی: پس از عملیات پخت و بیرون آوردن نمونه‌ها از درون فویل، پخت تکمیلی به مدت ۱۶۸ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در درون آون انجام شد. نمونه‌ها پیش از متعادل سازی توزین شده‌اند.

برای به دست آوردن سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون از غلظت‌های مختلف فورفوریل الکل در محلول اشباع می‌توان استفاده کرد. به طور معمول غلظت‌های مختلف را از راه انحلال فورفوریل الکل در آب یا اتانول به دست می‌آید که در این تحقیق برای این منظور از اتانول ۹۶٪ استفاده شده است. برای دستیابی به سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون، فورفوریل الکل با اتانول با نسبت حجمی ۷۰:۳۰، ۵۰:۵۰ و ۳۰:۷۰ به ترتیب برای سطوح کم، متوسط و به نسبت زیاد با هم مخلوط شدند. میزان در صد افزایش وزنی نمونه‌ها از راه معادله زیر محاسبه شد.

$$WPG (\%) = \frac{M_p - M_0}{M_0} \times 100$$

معادله ۱-

در این معادله  $M_0$ : وزن خشک نمونه پیش از اشباع و  $M_p$ : وزن خشک نمونه فورفوریل‌دار شده پس از تکمیل پلیمریزاسیون و پخت است.

بر پایه فرمول بالا نمونه‌ها در سه سطح با ۳ میزان متفاوت فورفوریل‌اسیون ۲۰٪، ۳۰٪ و ۶۵٪ آماده شده و با نمونه‌های شاهد مقایسه شده‌اند.

۵ نمونه تیمار شده برای هر خاصیت مکانیکی به مدت ۲ هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای ۲۵ درجه سلسیوس مشروط‌سازی شدند. سپس نمونه‌های خمش استاتیکی، کشش عمود بر الیاف، فشار عمود و موازی الیاف، برش موازی الیاف و سختی با پیروی از آیین‌نامه D-143 استاندارد ASTM با دستگاه اینسترون ۴۴۸۶ انجام شده‌اند [۱۵].

## نتایج و بحث

### خمش استاتیکی

انجام آزمون خمش استاتیکی روی نمونه‌های تیمار شده به منظور ارزیابی مدول کشسانی (MOE) و مدول

اشباع شده با رزین FA، گسترش یافته‌اند [۱۳]. قالب‌های ریخته‌گری فلز و چرخ‌های آسیاب هنوز هم جزء کاربردهای تجاری اصلی برای فورفوریل الکل به شمار می‌آیند.

چوب فورفوریل‌دار در ساخت سازه‌های چوبی، اسکله‌های چوبی، پل‌ها و در مبلمان پارک‌های شهری به عنوان جزئی از سازه‌های چوبی استفاده می‌شود، با توجه به اینکه تحقیقات انجام شده در سطح جهانی به بررسی ویژگی‌های فیزیکی مانند پایداری ابعادی این فرآورده چوبی پرداخته و تاکنون تحقیقات جامعی بر روی ویژگی‌های مکانیکی این محصول تجاری شده در سطح جهانی انجام نگرفته است، این تحقیق به بررسی ویژگی‌های مکانیکی چوب پلیمر راش- فورفوریل الکل پرداخته و ویژگی‌های مکانیکی این چند سازه را در سطوح مختلف (میزان کم، متوسط و به نسبت زیاد فورفوریل الکل) ارزیابی کرده است.

## مواد و روش‌ها

عملیات فورفوریل‌اسیون چوب راش بر پایه روش Thygesen و همکاران (۲۰۱۰) با اندکی تغییرات مانند تغییر در ابعاد، گونه چوبی، درصد مصرف کاتالیزور و دمای خشک کردن چوب راش پیش از آغاز تیمار به خاطر حساسیت بالاتر این گونه چوبی در سه مرحله اشباع، پخت و پخت تکمیلی انجام شده است [۱۴].

فورفوریل الکل ۹۸٪ ساخت شرکت مرک (Merck) برای فورفوریل‌اسیون و میزان ۱۱/۵٪ اسید سیتریک (بر پایه وزن فورفوریل الکل) به عنوان کاتالیزور مورد استفاده قرار گرفته‌است.

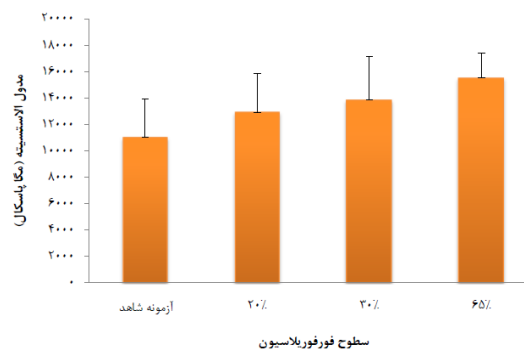
اشباع: نمونه‌ها مکانیکی با پیروی از آیین‌نامه D-143 استاندارد ASTM در سیلندر اشباع ۳۰ لیتری در خلاء (۰/۳ بار) به مدت ۴۵ دقیقه قرار گرفت [۱۵]. سپس مایع به درون سیلندر وارد و فشار ۶ بار به مدت ۲ ساعت اعمال شد. پس از خارج کردن نمونه‌ها از سیلندر، مایع اضافی از نمونه‌ها زدوده شده برای حذف اتانول موجود در چوب پیش از پلیمریزاسیون، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای محیط و ۲ ساعت در درون آون با دمای ۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس نمونه‌ها در درون فویل آلومینیومی پیچیده شدند و عملیات پخت به مدت ۱۶

افزایش در آزمون‌هایی با سطح بالای فورفوریل‌اسیون به-تقریب ۵۰ درصد بیشتر از آزمون‌های شاهد بوده است و با کاهش میزان درصد پلیمر فوران تا حد کم در حفره و جدار سلولی، افزایش میزان MOR به ۲۳٪ رسیده بود (شکل ۲).

به طور متعارف تغییر در ویژگی‌های چوب متناسب با سطح تیمار اعمال شده است. اصلاح شیمیایی کم، ویژگی‌های چوب را فقط اندکی متاثر خواهد ساخت در حالی که درجه‌های تیمار زیاد اثرگذاری‌های بیشتری خواهد داشت. به طور کلی درجه‌های تیمار متناسب با مصرف مورد نظر و هزینه‌های ساخت تعیین می‌شود. بر پایه تحقیقات به عمل آمده در درجه‌های بالای فورفوریل‌اسیون (حفظ بالای PFA) دامنه تغییرات گسترده‌ای از ویژگی‌های شامل افزایش فوق‌العاده سختی، پایداری استثنایی در برابر پوسیدگی میکروبی و حمله حشرات، پایداری زیاد در برابر تخریب شیمیایی، افزایش MOR و MOE و پایداری ابعادی زیاد قابل انتظار است. در مقادیر کمتر تثبیت منومر در چوب درصد بهبود ویژگی‌های در چوب تا اندازه‌ای کمتر رخ می‌دهد [۱۰، ۱۱ و ۱۶].

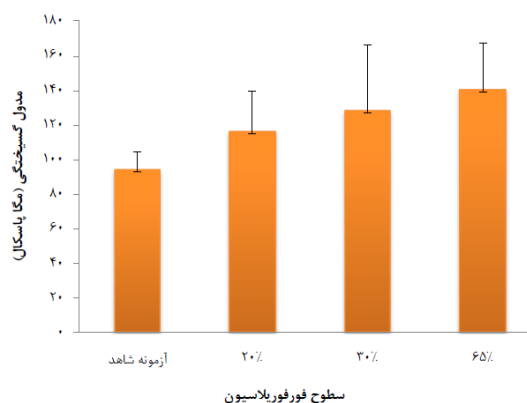
نتایج متفاوتی درباره آزمون خمش استاتیکی در منابع مختلف عنوان شده است. برخی از محققان بیان کرده اند که MOE تغییرات معنی‌داری در اثر استفاده از فورفوریل‌اسیون پیدا نمی‌کند و MOR اندکی افزایش می‌یابد و در برخی موارد نیز از افزایش قابل ملاحظه مقاومت خمشی سخن به میان آمده است. برخی از محققان مانند Langwig و همکاران (۱۹۶۹) علت کم شدن این مقادیر در برخی از موارد را مربوط به وابسته بودن این ویژگی‌ها به گونه‌چوب و چگالی چوب می‌دانند که باعث ضعف اتصال چوب و پلیمر شده و در نتیجه آن مقاومت خمشی افزایش چندانی نخواهد داشت. مشاهده‌های Langwig و همکاران (۱۹۶۹) نشان داد که در آزمون شاهد شکستگی‌های فشاری در تنش کم رخ داده و با وجود اینکه میزان تنش کششی در قسمت پایین بیشتر از آزمون‌های فورفوریل‌دار است، نمی‌تواند این شکست را جبران نماید. در نمونه‌های چوب پلیمر قسمت تحت فشار، تنش زیادی را تحمل کرده ولی مقاومت تحت کشش کاهش می‌یابد. اما افزایش تنش فشاری در قسمت بالایی

گسیختگی (MOR<sup>۱</sup>) آن‌ها و رصد کردن روند تغییر این دو شاخص بر حسب فورفوریل‌اسیون به کار گرفته شده، صورت گرفته است.



شکل ۱- تاثیر سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون بر مدول الاستیسته (MOE)

بر پایه مشاهده‌ها به دست آمده آزمون‌ها با میزان فورفوریل‌اسیون بالا بیشترین میزان MOE را داشته‌اند. افزایش MOE در این آزمون‌ها نسبت به شاهد ۴۱٪ محاسبه شده است. افزایش میزان مدول الاستیسته در سطوح متوسط و کم فورفوریل‌اسیون به ترتیب ۲۵ و ۱۷ درصد به دست آمده است (شکل ۱).



شکل ۲- تاثیر سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون بر مدول گسیختگی (MOR)

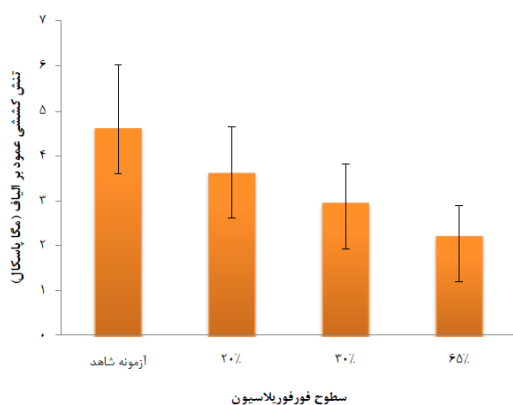
با پلیمریزاسیون منومر فورفوریل الکل در حفره و در منافذ جدار سلول چوب میزان مدول گسیختگی چوب نیز در آزمون‌های تیمار شده افزایش پیدا کرده بود. این

<sup>۱</sup> - Modulus of Rapture

میزان پلیمر فورانی به دنبال افزایش میزان فورفوریلایسیون و در نتیجه ایجاد اتصالات عرضی بیشتر در طی فرآیند پخت باید موجب بهبود مقاومت برش موازی الیاف در آزمون‌ها شده باشد [۲۱-۲۳].

### کشش عمود بر الیاف

نتایج آزمون کشش عمود بر الیاف آزمون‌های فورفوریل دار شده نشان داد که با فورفوریلایسیون و با افزایش سطح آن میزان این مقاومت کمتر می‌شود. آزمون‌های فورفوریل دار شده در سطوح به نسبت زیاد، متوسط و کم در مقایسه با آزمون شاهد، به ترتیب کاهش ۵۰، ۳۶ و ۲۱ درصدی را نشان دادند (شکل ۴).



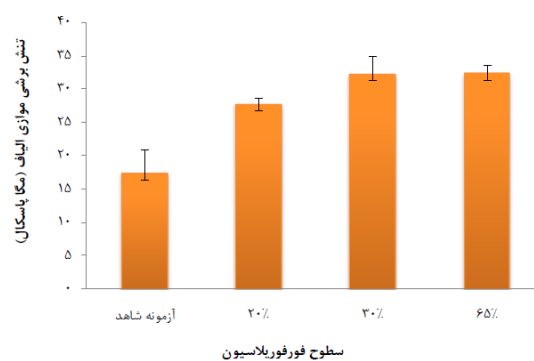
شکل ۴- تاثیر سطوح مختلف فورفوریلایسیون بر میزان تنش کشش عمود بر الیاف

بررسی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی واکشیدگی چوب راش توسط Buchelt و همکاران (۲۰۱۲) پس از اشباع با فورفوریل الکل نشان داد که تشکیل زنجیره‌های پلیمری در ساختمان سلولی چوب باعث واکشیدگی چوب و دیواره سلولی در ابعاد میکروسکوپی و ماکروسکوپی می‌شود [۲۴]. با تثبیت پلیمرهای تشکیل شده در دیواره سلولی واکشیدگی پایدار یا حجیم شدن دیواره سلولی با جایگزینی آن در برخی از محل‌های جذب رطوبت به دست می‌آیند [۱۰]. احتمال دارد در مرحله این واکشیدگی و حجیم شدن دیواره سلولی به خاطر رشد برخی از ریزترک‌های موجود در دیواره سلولی و وارد آمدن فشار بیشتر به جدار بین سلولی در اثر واکشیدگی الیاف، امکان اتفاق ناپوستگی میکروسکوپی بین الیاف، کاهش ظرفیت تحمل تنش کشش عمود بر الیاف فراهم شده است.

نمونه موجب افزایش درصد ضریب گسیختگی چوب - پلیمر در مقایسه با شاهد می‌شود [۱۷ و ۱۸]. از نظر Siau و همکاران (۱۹۶۸) و Schneider و همکاران (۱۹۹۰)، شکست در آزمون‌های تحت خمش استاتیکی در آغاز در قسمت کششی رخ می‌دهد ولی هیچ مدرکی دال بر شکست ناگهانی یا گسیختگی در آزمون‌های چند سازه چوب پلیمر وجود ندارد. حضور پلیمر در چوب باعث سفتی نسبی جداره نازک سلولی شده و می‌تواند از کماتش آن تحت بار فشاری جلوگیری کند این موارد باعث افزایش نسبی مقاومت خمشی استاتیکی در چوب پلیمر می‌شود [۱۹ و ۲۰].

### برش موازی الیاف

یکی از ضعف‌های محدود کننده چوب برای ساخت سازه‌های چوبی ظرفیت تحمل کم آن در تحمل تنش برشی موازی الیاف و کشش عمود بر الیاف است. آزمون‌های انجام شده بر روی آزمون‌های فورفوریل دار شده نشان داد که با فورفوریلایسیون مقاومت برشی نمونه‌ها بیش از ۸۰٪ افزایش می‌یابد. شیب تغییرات تنش برشی در نمونه‌هایی با سطح فورفوریلایسیون کم نسبت به شاهد زیادتر بوده و با بالا رفتن سطح تیمار، سرعت تغییر در میزان مقاومت کمتر مشاهده می‌شود (شکل ۳).



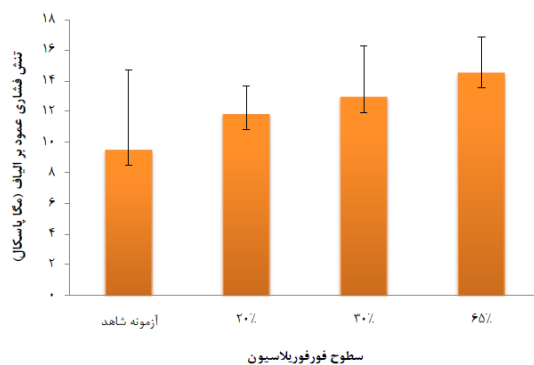
شکل ۳- تاثیر سطوح مختلف فورفوریلایسیون بر میزان تنش برشی

در شبکه چوب و پلیمر اتصال درونی و نیز ارتباط با رشته‌های سلولزی بوجود می‌آید و مجموعاً سیستم دو فاز مرکب حاصل می‌شود. همان طوری که انتظار می‌رود، ترکیب حاصل خاصیت چوب و هم خاصیت پلیمر را دارد. اغلب مقاومت و سفتی این ترکیب بهتر می‌شود. افزایش

دیواره و حفره سلولی خاصیت جذب و دفع رطوبت را توسط جداره سلول‌ها کاهش می‌دهد و میزان رطوبت تعادل متفاوتی در آن‌ها به وجود آمده و مقادیر مقاومت تا حدی تحت تاثیر میزان رطوبت تعادل آزمون‌ها قرار خواهد گرفت. از سویی، پلیمریزاسیون منومر در حفره و دیواره سلولی باعث بوجود آمدن اتکای جانبی برای جدار سلولی شده و پلیمر کمانش الیاف را به تنش فشاری بالاتر ارتقای داده است و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف شده است [۱۷-۱۹، ۲۵ و ۲۶].

### فشار عمود بر الیاف

نتایج آزمون فشار عمود بر الیاف نشان داد که با زیادتر شدن سطح فورفوریل‌اسیون میزان مقاومت بین ۲۴ تا ۵۳ درصد نسبت به آزمون‌های شاهد افزایش پیدا می‌کند (شکل ۷).



شکل ۷- تاثیر سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون بر میزان تنش فشار عمود بر الیاف

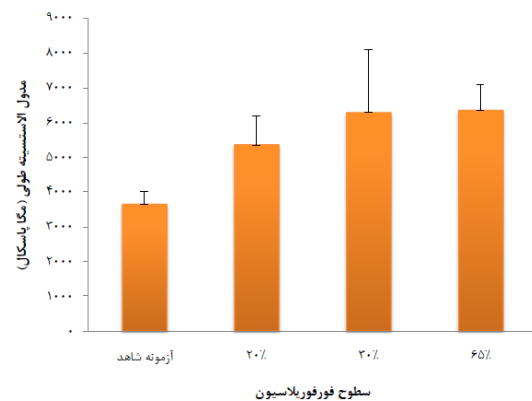
### سختی

غیر از آزمایش‌های کشش، فشار، برش موازی الیاف و خمش استاتیکی، آزمایش‌های دیگری هم برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی ابداع شده‌اند که آزمایش سختی از آن جمله است. مقادیری که برای سختی با آزمایش به دست می‌آید، در طراحی کاربرد مستقیم ندارد اما برای مقایسه سودمند است. سختی برای ارزیابی گونه‌ها و فرآورده‌ها در کاربردهای پارکت و مبلمان مهم می‌باشد [۲۱].

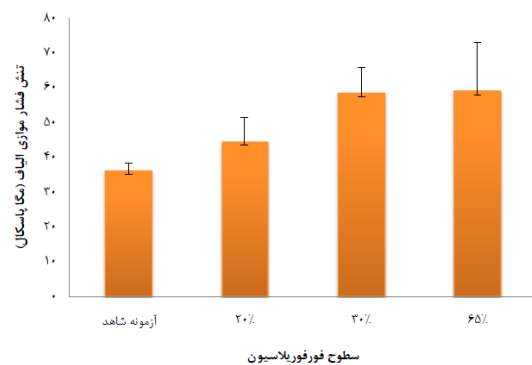
نتایج آزمون سختی نشان داد که مقادیر سختی شعاعی به میزان قابل ملاحظه‌ای با فورفوریل‌اسیون افزایش می‌یابد و در سطوح متوسط و بالای فورفوریل‌اسیون میزان

### فشار موازی الیاف

نتایج آزمون فشار موازی الیاف نشان داد که با فورفوریل‌اسیون و افزایش سطح آن در حد متوسط میزان این مقاومت و به پیروی آن مدول الاستیسیته طولی از سطح متوسط به بالا افزایش قابل ملاحظه‌ای به ترتیب ۶۱ و ۷۲ درصد را نشان می‌دهد (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۵- تاثیر سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون بر مدول الاستیسیته طولی



شکل ۶- تاثیر سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون بر میزان تنش فشار موازی الیاف

Esteves و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با پلیمریزاسیون فورفوریل الکل در چوب کاج در رطوبت‌های نسبی مختلف میزان رطوبت تعادل نمونه‌های فورفوریل‌دار شده نسبت به نمونه‌های شاهد نزدیک به ۷۵٪ کاهش می‌یابد [۱]. در چوب پلیمر فورفوریل الکل افزایش میزان مقاومت فشاری موازی الیاف با فورفوریل‌اسیون می‌تواند به دو دلیل در این چوب پلیمر رخ داده باشد، پلیمریزاسیون فورفوریل الکل در



اعضای چوبی که به طور همزمان تحت بارهای کششی و فشاری قرار می‌گیرند، کاهش خواهد یافت.

اتصال‌ها در سازه‌های چوبی ساخته شده با چوب پلیمر راش-فورفوریل الکل بررسی شود. احتمال دارد تاثیر منفی فورفوریل‌اسیون (کاهش مقاومت به کشش عمود بر الیاف) در صورت استفاده از

## مراجع

- [1] Esteves, B., Nunes, L. and Pereira, H., 2011. Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*), European Journal Wood Product, 69:521–525
- [2] Goldstein, I.S., 1955. The impregnation of wood to impart resistance to alkali and acid, Forest product journal, 5(4):265–267.
- [3] Goldstein, I.S., 1960. Impregnation solutions and methods. Patent GB846680.
- [4] Goldstein, I.S. and Dreher, W.A., 1960. Stable furfuryl alcohol impregnating solution, Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(1): 57–58.
- [5] Anaya, M., Alvarez, A., Novoa, J., Gonzalez, M. and Mora, M., 1984. Modification of wood with furfuryl alcohol. Revista sobre los Derivados de la Cana de Azucar, 18(1): 49–53.
- [6] Anaya, M., 1987. Impregnation procedure based on furfuryl alcohol monomer into wood and other materials, Cuban patent CU21453
- [7] Schneider, M.H., 1995. New cell wall and cell lumen wood polymer composites, Journal Wood Science Technology, 29:135–158
- [8] Westin, M., 1995. Development and evaluation of new alternative wood preservation treatments. Mid-term status report to the Swedish Council for Forestry and Agricultural Research (SJFR). (In Swedish with English summary).
- [9] Westin, M., Ohlsson, B., Simonson, R. and Nilsson, T., 1996. In Proceedings of the 212th ACS. National Meeting, Orlando, FL, USA, August 25–29.
- [10] Lande, S., Westin, M. and Schneider, M., 2004. Properties of furfurylated wood, Scandinavian Journal of Forest Research 19(5):22–30.
- [11] Epmeier, H., Johansson, M., Kliger, R. and Westin, M., 2007. Bending creep performance of modified timber, Holz als Roh-und Werkstoff, 65:343–351.
- [12] Lande, S., Riel, S., Hoibo, O.A. and Schneider, M.H., 2010. Development of chemometric models based on near infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis for predicting the treatment level of furfurylated Scots pine, Wood Science and Technology, 44:189–203.
- [13] Dunlop, A.P. and Peters, F.N., 1953. Miscellaneous solvent uses, The Furans, Reinhold Publishing Corp. New York, NY. Pp 764-773
- [14] Thygesen, L.G., Barsberg, S. and Venas, T.M., 2010. The fluorescence characteristics of furfurylated wood studied by fluorescence spectroscopy and confocal laser scanning microscopy, Wood Science and Technology, 44:51–65
- [15] ASTM D 143-94 Standard (1994) Standard test method for small clear specimens of timber. Designation, West Conshohocken, 31p.



- [16] Lande, S., Westin, M. and Schneider, M., 2008. Development of modified wood products based on furan chemistry, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 484:367-378
- [17] Langwig, J.E., Meyer, J.A. and Davidson, R.W., 1968. Influence of polymer impregnation on mechanical properties of bass-wood, *Forest Product Journal*, 18(7):33-36.
- [18] Langwig, J.E., Meyer, J.A. and Davidson, R.W., 1969. New monomers used in making wood – plastic, *Forest Product Journal*, 19(10):57-61.
- [19] Schneider, M.H., Phillips, J.G., Tingley, D.A. and Brebner, K.I., 1990. Mechanical properties of polymer-impregnated sugar maple. *Forest Product Journal*, 40 (1), 37–41.
- [20] Siau, J.F., Davidson, R.W., Meyer, J.A., Skaar, C., 1968. A geometrical model for wood– polymer composites. *Wood Science*, 1(2), 116–128.
- [21] Ebrahimi G, 1998. *Mechanics of wood and wood composites*, 2nd ed. Tehran university publication, Tehran, Iran, 686p.
- [22] Pranger, L. and Tannenbaum R., 2008. Biobased nanocomposites prepared by in situ polymerization of furfuryl alcohol with cellulose whiskers or montmorillonite clay, *Macromolecules*, 41 (22): 8682-8687.
- [23] Gonzalez, R., Figueroa, J.M. and Gonzalez, H., 2002. Furfuryl alcohol polymerization by iodine methylene chloride, *European Polymer Journal*, 38:287-297.
- [24] Buchelt, B., Dietrich, T. and Wagenführ, A., 2012. Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol, *European Journal Wood Product*, 70 (6):865-869.
- [25] Brebner, K.I., Schneider, M.H. and St-Pierre, L.E., 1985. Flexural strength of polymer- impregnated eastern white pine, *Forest Product Journal*, 35(2):22-27.
- [26] Neyestani, F. 1987. Effect of several improvement approaches on the Iranian domestic wood species for utilization in loom industry, M.Sc. Thesis, department of wood science and technology, Tehran University, 88 p.
- [27] Ebrahimi G, 1998. *Mechanical strengths of wood and its element and analysis of wood- based composites panel warping*, first ed. Tehran university publication, Tehran, Iran, 380p.

## Mechanical properties of Beech -Furfuryl alcohol wood polymer

### Abstract

In this study, mechanical properties of wood polymer (beech-furfuryl alcohol) were investigated. In this regard, the properties of specimens with three different values of furfurylation (20%, 30% and 65%) in comparison with control specimens were evaluated. The furfurylation was carried out with impregnation of specimens with full-cell method followed by polymerization of furfuryl alcohol monomer with heat catalyst. Static bending, tension perpendicular to the grain, compression parallel and perpendicular to the grain, shear parallel to the grain and hardness of specimens were determined according to ASTM D-143. Results have shown that with increasing furfurylation, static bending strength increases and tension perpendicular to the grain decreases. In addition, the compression perpendicular to the grain and shear parallel to the grain in specimens with high furfurylation value increases in comparison with control specimens. The radial hardness of the wood polymer specimens in comparison with control specimens increases greatly and ascendant trend of specimen's hardness was observed being increasing with furfurylation value.

**Key word:** Furfurylation, Static bending, Shear parallel to the grain, Compression parallel and perpendicular to the grain

**H. Abdolzadeh**<sup>1\*</sup>  
**G. Ebrahimi**<sup>2</sup>  
**M. Layeghi**<sup>3</sup>  
**M. Ghassemieh**<sup>4</sup>  
**S. A. Mirshokrai**<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD student, <sup>2</sup>Professor, <sup>3</sup>Assistant Professor, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Civil Engineering Faculty, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>5</sup>Professor, Department of chemistry Payame Noor Univresity, Tehran

Corresponding author:  
h\_abdolzadeh@ut.ac.ir

Received: 2013.03.06  
Accepted: 2013.06.08