

## بررسی اثرگذاری های فشرده‌سازی بر ویژگی های مکانیکی چوب پالونیای اشباع شده با رزین فنل فرمالدئید

مژگان سکالو<sup>۱\*</sup> و ابوالقاسم خزاعیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد فرآورده‌های چندسازه چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
<sup>۲</sup> استادیار گروه فرآورده‌های چند سازه چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### چکیده

کمبود مواد اولیه چوب و تقاضای روزافزون این ماده، صنعت چوب را با تنگناهایی روبه‌رو کرده‌است و سبب گرایش این صنعت به استفاده از گونه‌های تندرشد مانند پالونیا شده‌است. کاشت درختان تندرشد راه حل مناسبی است اما از طرفی این گونه با داشتن چگالی (دانسیته) کم، از مقاومت‌های پایینی برخوردار است. در این تحقیق اثرگذاری های فشرده‌سازی چوب پالونیا (*Paulownia fortunei*) اشباع شده با رزین فنل فرمالدئید به منظور بهبود برخی ویژگی های مکانیکی صورت گرفت و تأثیر عامل های جهت فشرده‌سازی، درصد فشرده‌سازی و نوع رزین مورد بررسی قرار گرفت. چوب پالونیا با توجه به استاندارد هر یک از آزمون‌های مکانیکی به تکه های چوبی تبدیل شدند. نمونه‌ها با رزین فنل فرمالدئید (غلظت ۱۰٪) اشباع شدند و در دو جهت فشرده‌سازی شعاعی و مماسی، و سه درصد فشرده‌سازی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ توسط دستگاه پرس در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و زمان ۱۲ دقیقه فشرده شدند. نتایج نشان دادند که تیمار شیمیایی رزین سبب افزایش مقاومت‌های مکانیکی به جز مقاومت به ضربه شد. مقاومت به ضربه نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های تیمار شده با فنل بیشتر بوده‌است. مقاومت به فشار موازی الیاف، مدول گسیختگی و مدول کشسانی (الاستیسیته) افزایش یافتند. بیشترین مقدار مدول گسیختگی، مدول کشسانی و مقاومت به فشار موازی الیاف در نمونه‌های اشباع شده با فنل فرمالدئید در جهت شعاعی با درصد فشرده‌سازی ۵۰ حاصل شده‌است.

**واژه‌های کلیدی:** پالونیا (*Paulownia fortunei*)، فنل فرمالدئید، مدول گسیختگی، مدول کشسانی، فشرده‌سازی، تیمار شیمیایی، درصد فشرده‌سازی، مقاومت به ضربه

## مقدمه

یکی از روش‌های بهبود ویژگی های فیزیکی و افزایش ویژگی های مکانیکی چوب درختان تندرشد و سبک، اصلاح از راه افزایش چگالی<sup>۱</sup> آنها می‌باشد که در طی آن چگالی چوب با اعمال فشار (فشرده‌سازی<sup>۲</sup>)، روی چوب اشباع شده با یک ماده سیال و یا ترکیب این دو روش افزایش می‌یابد [۱۰]. با عمل فشرده‌سازی چوب عناصر سازنده چوب، آوندها و فیبرها (الیاف چوبی) در هم فرو رفته و فاصله الیاف کمتر می‌شود. فضاهای خالی موجود در چوب کمتر شده و تراکم الیاف بیشتر می‌شود [۸]. چوب همگن‌تر شده و وزن مخصوص آن افزایش می‌یابد و در نتیجه ویژگی های مکانیکی چوب بهبود می‌یابد [۱۰]. اما چوب به دلیل رفتار کشسانی (الاستیکی) که دارد پس از فشرده‌شدن، تمایل به بازگشت به شکل اولیه خود دارد یعنی هنگامی که فشار برداشته می‌شود و در معرض رطوبت قرار می‌گیرد شکل پیشین خود را باز می‌یابد. این پدیده به اثر حافظه شکلی<sup>۳</sup> مشهور است و میزان بازگشت آن نیز بازبایی شکل<sup>۴</sup> نامیده می‌شود [۹،۱۱،۷،۳]. برای رفع بازبایی شکل و بازگشت فنری نمونه‌ها می‌توان از روش‌های گوناگونی مانند تیمار گرمایی، تیمار شیمیایی، تیمار گرمایی- مکانیکی استفاده نمود.

فشرده‌سازی چوب‌های سبک موجب می‌شود که کاربرد این چوب‌ها که به دلیل پائین بودن چگالی و ویژگی های مکانیکی کمتر مورد توجه و استقبال صنعت‌گران هستند، افزایش یابد. چوب فشرده‌شده کاربردهای گوناگونی دارد. از این نوع چوب‌ها در صنعت ساختمان، مبلمان، در و پنجره‌سازی و... استفاده می‌شود. البته فشرده‌سازی چوب‌های سنگین نیز متداول است که از آن‌ها در مواردی که به مقاومت خیلی بالا نیاز است، استفاده می‌شود [۱۱،۱۰،۱]. گونه‌های سبک فشرده‌شده در شرایط تأمین مواد اولیه می‌توانند جایگزین مناسبی برای گونه‌های جنگلی و الوارهای وارداتی باشند. در این روش چگالی چوب تحت اشباع حفره لومن یا دیواره سلولی با مایع

شیمیایی همراه با فشرده‌گی نسبت به چوب معمولی افزایش می‌یابد. برای افزایش چگالی، فضاهای خالی چوب با مواد شیمیایی مانند رزین‌های فنل‌فرمالدئید، رزین‌های طبیعی، واکس‌ها، وینیل‌های مایع، سولفور و فلزهایی با دمای ذوب کم اشباع می‌شود. اگر مونومر یا پیش‌پلیمری، به خاطر طبیعت قطبی بودنشان یا وزن مولکولی پائینشان بتوانند به درون دیواره سلولی نفوذ کنند و روزه‌های ریز آن را اشغال کنند در این صورت چندسازه به دست آمده را چوب پلیمر دیواره‌ای می‌نامند. طبیعی است که این نوع چوب‌پلیمرها از پایداری ابعادی بالاتری برخوردارند. وجود پلیمر در داخل روزه‌های دیواره سلولی موجب می‌شود که چوب در حالت ورم (آماس) کرده باقی بماند و دیگر هم‌کشیده نشود. همچنین چون در این حالت روزه‌ها دیگر ظرفیتی برای جذب آب ندارند بنابراین واکشیده نخواهند شد [۱۲].

شمس و همکاران (۲۰۰۶) تغییر شکل چوب فشرده و اشباع‌شده با رزین فنل‌فرمالدئید مورد ارزیابی قرار دادند. ۸ نمونه از گونه‌های مختلف (آلبیزیا، سدر ژاپن، لوآن قرمز، نارون، صنوبر اروپایی، داگلاس‌فر، راش ژاپن، توس) تحت اشباع و فشرده‌گی با فشار ۲ مگاپاسکال قرار گرفت و نتایج نشان داد که ویژگی های مکانیکی (فشار موازی الیاف، خمش) چوب اشباع شده با رزین (به‌ویژه چگالی کم) با افزایش چگالی زیاد می‌شود [۱۶].

شمس و یانو (۲۰۰۹) روکش‌هایی از سدر ژاپن در آغاز با محلول آبی ۲ درصد سدیم کلرید و سپس ۵ درصد سدیم هیدروکسید تیمار دادند. نتایج نشان داد که پلی-مریزاسیون یا جابجایی فضایی لیگنین می‌تواند برای جابجایی همی‌سلولز موثر باشد، زیرا دیواره سلول را نرم می‌کند تا توسط رزین فنل‌فرمالدئید واکشیده شود و این امکان را فراهم می‌کند تا چوب‌ها به میزان قابل چشمگیری در فشار پائین ۱ مگاپاسکال فشرده شوند و باعث تغییر شکل خزشی چوب اشباع شده با رزین و در نهایت افزایش دانسیته ۱/۱۶ گرم بر سانتیمتر مکعب و مدول کشسانی ۲۹ گیگاپاسکال و مقاومت خمشی ۳۰۷ مگاپاسکال شوند [۱۵].

رودریگز و همکاران (۲۰۰۵) مقایسه‌ای در مورد مقاومت فشاری چوب‌های اشباع شده و اشباع نشده اوکالیپتوس

<sup>1</sup> Densification

<sup>2</sup> Compressing

<sup>3</sup> Shape memory

<sup>4</sup> Set recovery

برای انجام این تحقیق از گونه پالونیا<sup>۱</sup> کاشته شده در جنگل آموزشی و پژوهشی دکتر بهرام‌نیا، واقع در جنگل شصت کلاته گرگان استفاده شد. پایه‌های قطع شده به کارگاه صنایع چوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل شد. در آغاز توسط اره نواری برش‌های اولیه و با اره‌های گرد برش‌های ثانویه صورت گرفت. از دستگاه گنده‌گیر برای صافی سطح نمونه‌ها نیز استفاده شد. نمونه‌ها به ابعاد مورد نظر برابر استاندارد در هر آزمایش تهیه شد. نمونه‌ها بدون دواير مغزی بودند و پهنای آنها در جهت مماسی چوب و ضخامت آنها در جهت شعاعی چوب برش داده شد. نمونه‌های معیوب (باختگی، واجد گسیختگی، گره، ...) نیز حذف شدند. آزمون‌های مکانیکی شامل ۱۲ تیمار بوده است. برای هر تیمار ۵ تکرار در نظر گرفته شد. لازم به یادآوری است که نمونه‌ها به طور تصادفی از برون چوب یک گرده‌بینه سالم تهیه شدند. ابعاد نمونه‌ها در آزمون‌های مکانیکی با توجه به استاندارد هر آزمون محاسبه شد. به این صورت که برای تعیین مقاومت خمشی از استاندارد ISO 3133-1975 و مقاومت فشار موازی الیاف ISO 3787-1976 پیروی شد. در آزمون‌های مکانیکی ضخامت نهایی نمونه‌های فشار موازی الیاف و خمش ۲۰ میلی‌متر و در آزمون ضربه ۱۰ میلی‌متر است. بنابراین برای محاسبه ضخامت اولیه (پیش از فشرده‌سازی) از معادله زیر استفاده شد تا پس از فرآیند فشرده‌سازی، ضخامت ۲۰ و یا ۱۰ میلی‌متر برابر استانداردهای یاد شده در آزمون بدست آید.

$$T_F = T_I - \left( \frac{C}{100} \times T_I \right)$$

که در آن:

$T_F$  = ضخامت نهایی

$T_I$  = ضخامت اولیه

$C$  = فشردگی

نمونه‌های شاهد نیز عامل‌های مورد بررسی را شامل می‌شوند اما با رزین اشباع نشده‌اند (جهت و درصد فشردگی).

در دو فشار مختلف و دو زمان متفاوت اشباع انجام دادند. به دلیل اینکه دوام چوب تحت تأثیر عامل‌های مختلفی است، تحقیقات زیادی روی ترکیبات شیمیایی مختلف برای اشباع چوب انجام شده که هدف آنها حفاظت و بهبود ویژگی‌های آن بوده است. این تحقیق به همراه بررسی‌های دیگر امکان بهبود ویژگی‌های مکانیکی چوب را ثابت کرد. نتایج نشان داد که مقاومت فشردگی نمونه‌های اشباع شده از انواع بدون اشباع بیشتر است. در این تحقیق از رزین پلی‌اورتان که برای اشباع چوب مناسب است استفاده شد، که مقاومت فشاری چوب اوکالیپتوس را افزایش داد [۱۳].

گابریلی و کامکه (۲۰۰۹) در مورد تزریق رزین فنل-فرمالدئید و فشرده‌سازی چوب برای بهبود ثبات ابعادی، تحقیقاتی را انجام دادند. ۲ نوع رزین فنل با وزن مولکولی متوسط ۱۷۲ و ۷۸۰ در ۳ غلظت ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد برای اشباع گزینش شد. پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در دمای اتاق و ۲ ساعت در آب جوش، ۲ تیمار رزین در همه سطوح ثبات ابعادی بالایی بدست آمد که قابل مقایسه با نمونه‌های شاهد بدون رزین و فشردگی گرمایی و ویسکوالاستیکی نبود [۱۵].

به طور کلی هدف از این تحقیق بهبود ویژگی‌های مکانیکی چوب پالونیا با تیمار شیمیایی رزین فنل-فرمالدئید همراه با فشردگی و گرمای آن می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق تأثیر سه عامل رزین، درصد و جهت فشردگی بر ویژگی‌های مکانیکی پالونیا مورد بررسی قرار گرفت. عامل رزین در دو سطح (محلول فنل‌فرمالدئید با غلظت ۱۰ درصد و قابل حل در الکل و شاهد)، درصد فشردگی در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد و جهت فشردگی شعاعی و مماسی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱). نمونه‌های شاهد با رزین اشباع نشده‌اند، اما در دو جهت و سه درصد فشردگی و دو زمان و دمای پرس همانند نمونه‌های اصلی فشرده شدند.

<sup>1</sup> Paulownia fortunei

جدول ۱- عامل های مورد آزمایش و سطوح آنها

سطوح		عوامل متغیر
فنل فرمآلدئید (۰٪)	فنل فرمآلدئید (۱۰٪)	نوع رزین
مماسی	شعاعی	جهت فشردگی
۵۰	۳۰	درصد فشردگی

می‌شود. پیش از بارگذاری ابعاد نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. بارگذاری توسط دستگاه آزمون مکانیکی مدل PT100L واقع در مجتمع آموزش عالی گنبد انجام گرفت.

بر طبق آیین‌نامه استاندارد ISO 3787-1976 نمونه‌هایی به ابعاد ۲۰×۲۰×۶۰ میلی‌متر برای تعیین مقاومت فشار موازی الیاف آزمایش شدند [۱۸]. آیین‌نامه استاندارد EB 23-94B از آزمون IzOD برای تعیین مقاومت به ضربه استفاده شد. در این روش نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰×۷۰ میلی‌متر (طول×عرض×ضخامت) به طور عمودی و در نتیجه اعمال ضربه با یک آونگ چکشی واقع در آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی کرج مورد آزمایش قرار گرفتند [۱۹].

برای این تحقیق از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. تجزیه واریانس داده‌ها در قالب طرح‌های چند عاملی به صورت اثرگذاری عامل های ثابت تجزیه شد و با نرم افزار Minitab انجام پذیرفت. آزمون دانکن به کمک نرم افزار SPSS انجام شد. پیش از انجام تجزیه واریانس، عادی (نرمال) بودن داده‌ها بررسی شد.

### نتایج و بحث

#### اثر متغیرها بر مقاومت به ضربه

- بررسی اثرگذاری مستقل عامل های آزمایشی بر مقاومت به ضربه پالونیا

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر مستقل رزین، درصد و جهت فشردگی بر مقاومت به ضربه معنادار است (جدول ۲).

برای اندازه‌گیری درصد رطوبت، چند نمونه که به طور تصادفی تهیه شده بودند در درون اتو با دمای  $103 \pm 1$  سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. با توجه به آزمون‌های اولیه رطوبت ۵ درصد برای اشباع، مناسب در نظر گرفته شد. بنابراین نمونه‌ها برای رسیدن به رطوبت ۵ درصد در اتو با دمای ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. برای اشباع از سیلندر اشباع موجود در آزمایشگاه صنایع چوب استفاده شد. نمونه‌ها پیش از اشباع توزین شدند. فرآیند اشباع به روش بتل (سلول پر اصلاح شده) انجام شد. پس از پایان مرحله اشباع نمونه‌ها در درون آون با دمای  $50^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند تا حلال‌ها از نمونه‌ها خارج شود. پس از آن نمونه‌ها در اتاق شرایط ثابت (کلیما) قرار داده شدند تا به رطوبت ۱۲٪ برسند. درانتهای این مرحله و پیش از فشرده‌سازی ضخامت دقیق نمونه‌ها توسط کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری می‌شود. برای فشرده‌سازی از یک پرس OTT آلمانی با قطر سیلندر ۲۶ سانتی‌متر استفاده شد. ابعاد مفید صفحات پرس  $50 \times 50$  سانتی‌متر مربع است. فشرده‌سازی در دو جهت شعاعی و مماسی انجام شد. برای انجام فشرده‌سازی از شابلون‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متری به ترتیب برای درصد فشردگی ۵۰، ۴۰ و ۳۰ درصد استفاده شد. دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتیگراد و زمان پرس ۱۲ دقیقه در نظر گرفته شد. فشار وارد بر نمونه‌ها ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است.

برای تعیین مقاومت خمشی برابر با آیین‌نامه استاندارد ISO 3133-1975 عمل شد [۱۷]. ابعاد نمونه استاندارد در این آزمون  $20 \times 20 \times 300$  میلی‌متر و طول دهانه ۲۲۰ میلی‌متر است و بار در وسط دهانه اعمال

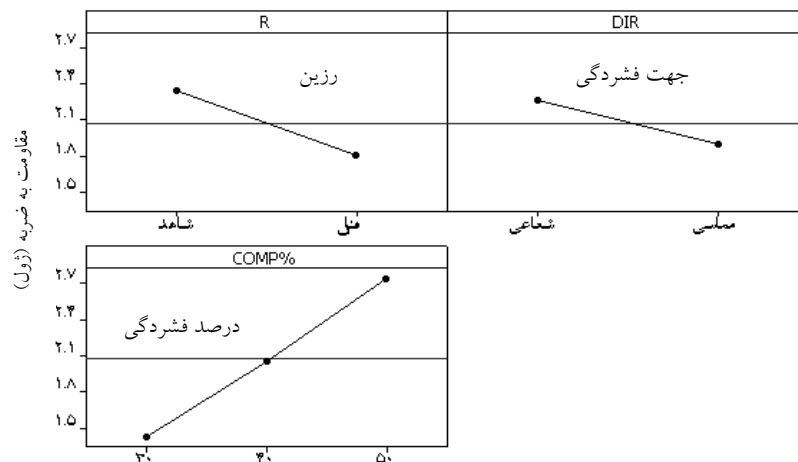
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس متغیرها بر مقاومت به ضربه

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	P
رزین	۴/۳۹۰۲	۴۵/۹۱	۰/۰۰۰*
جهت فشردگی	۲/۰۰۵۷	۲۰/۹۷	۰/۰۰۰*
درصد فشردگی	۸/۷۶۳۰	۹۱/۶۳	۰/۰۰۰*
رزین × جهت فشردگی	۰/۱۳۹۲	۱/۴۶	۰/۲۳۴
رزین × درصد فشردگی	۰/۱۸۶۴۸	۹/۰۴	۰/۰۰۰*
جهت × درصد فشردگی	۰/۱۴۸۵	۱/۵۵	۰/۲۲۲

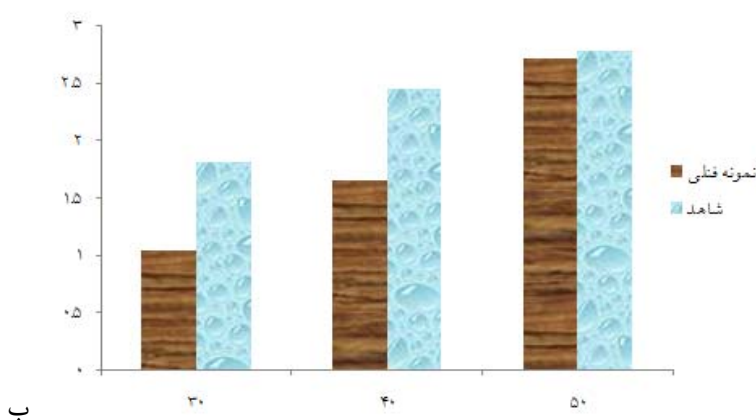
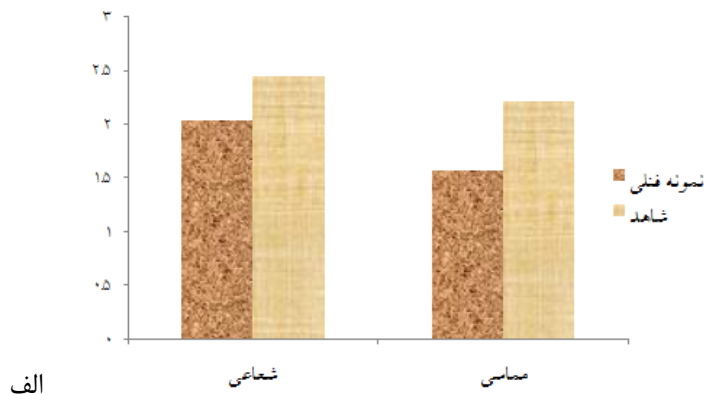
\* معنی داری در سطح ۰/۰۵

از سوی دیگر نمونه‌های فشرده شده در جهت شعاعی مقاومت به ضربه بالاتری نسبت به جهت مماسی دارند. با توجه به نمودار شکل ۲ الف روشن است که مقاومت به ضربه در دو جهت شعاعی و مماسی نمونه‌های شاهد در مقایسه با نمونه‌های تیمار شده بیشتر است. در این بخش هم می‌توان تأثیر منفی رزین را بر مقاومت به ضربه مشاهده کرد. با بررسی نتایج آزمون دانکن از نظر درصد فشردگی، سه گروه مشخص شده است. گروه اول با درصد فشردگی ۳۰ کمترین میزان مقاومت به ضربه، گروه دوم با درصد فشردگی ۴۰ با مقاومت متوسط و گروه سوم با درصد فشردگی ۵۰ بیشترین میزان مقاومت به ضربه دارند (جدول ۳).

نمودار شکل ۱ نشان می‌دهد که اثر رزین بر مقاومت به ضربه در سطح ۵ درصد معنی دار است. می‌توان گفت که تیمار با رزین مقاومت به ضربه را کاهش می‌دهد و تأثیر منفی بر این ویژگی مکانیکی دارد. مقاومت به ضربه نمونه‌های اشباع شده با رزین فنل فرمالدئید کمتر از نمونه‌های شاهد است. این نتیجه با تحقیقات راول و همکاران (۱۹۸۷) همخوانی دارد. توجه این پدیده می‌تواند این‌گونه باشد که اشباع با رزین موجب کاهش انعطاف‌پذیری یا کاهش تغییر شکل در هنگام شکست نمونه‌ها می‌شود زیرا از توزیع یکنواخت انرژی در چوب جلوگیری می‌کند و در نتیجه مقاومت به تنش‌های آنی در چوب کاهش می‌یابد.



شکل ۱- نمودار اثرگذاری های مستقل متغیرها بر مقاومت به ضربه



شکل ۲- میانگین مقاومت به ضربه در نمونه‌های تیمار شده و شاهد در الف) دو جهت فشردگی و ب) سه درصد فشردگی

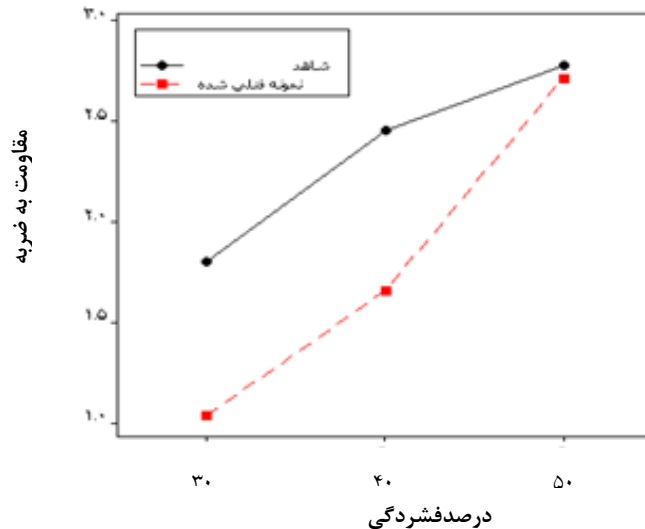
جدول ۳- گروه‌بندی دانکن برای مقاومت به ضربه

گروه‌بندی			تعداد	درصد فشردگی
۳	۲	۱		
		۱/۴۲۲۰	۲۰	۳۰
	۲/۰۵۷۰		۲۰	۴۰
۲/۷۴۵۵			۲۰	۵۰

باشد، نشان می‌دهد که انرژی جذب شده توسط چوب بیشتر بوده است (بادیگ و جین، ۱۹۸۲). در نمودار ۲ ب میانگین مقاومت به ضربه نمونه‌های تیمار شده در درصد فشردگی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ نسبت به شاهد نشان داده شده است میانگین مقاومت به ضربه نمونه‌های شاهد و تیمار شده با افزایش درصد فشردگی افزایش یافت.

با افزایش درصد فشردگی نیز مقاومت به ضربه به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (جدول ۳). افزایش درصد فشردگی سبب افزایش چگالی و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه شده است. در فشرده‌سازی نیروی فشاری به طور عرضی بر چوب اعمال و منجر به کاهش ضخامت می‌شود. بنابراین کاری انجام شده است و انرژی این کار توسط چوب جذب شده و به صورت تغییر شکل در چوب باقی مانده است. هر چه این تغییر شکل بیشتر

شده با فنل فرمالدئید مقاومت به ضربه در درصد فشردگی ۵۰ بیشترین مقدار است. در حالی که مقاومت به ضربه در سطح فشردگی ۵۰٪ در نمونه‌های شاهد و تیمار شده با رزین فنل فرمالدئید به تقریب در یک سطح قرار دارند. بنابراین افزایش درصد فشردگی در نمونه‌های تیمار شده بر مقاومت به ضربه اثر افزایشی و بهبودی خواهد داشت.



شکل ۳- نمودار اثرگذاری های متقابل متغیر رزین و درصد فشردگی بر مقاومت به ضربه

های شاهد بیشتر است و این امر بیانگر آن است که تیمار رزین تأثیر مثبتی بر افزایش مدول گسیختگی داشته است. مدول گسیختگی با میانگین ۵۵/۲۸ مگاپاسکال در جهت شعاعی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که درصد فشردگی نیز اثر معنی‌داری بر مدول گسیختگی دارد. افزایش درصد فشردگی موجب افزایش معنادار مدول گسیختگی شده است (جدول ۴). با بررسی نتایج آزمون دانکن از نظر درصد فشردگی، سه گروه مشخص شده است. گروه اول با درصد فشردگی ۳۰ با کمترین میزان مدول گسیختگی، گروه دوم با درصد فشردگی ۴۰ با مقدار متوسط مدول گسیختگی و گروه سوم با درصد فشردگی ۵۰ بیشترین مدول گسیختگی را دارند (جدول ۵).

بررسی اثرگذاری های متقابل بر مقاومت به ضربه پالونیا

نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل رزین و درصد فشردگی نیز بر مقاومت به ضربه در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده می‌شود مقاومت به ضربه نمونه‌های شاهد با افزایش درصد فشردگی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در نمونه‌های اشباع

### اثر متغیرها بر مدول گسیختگی

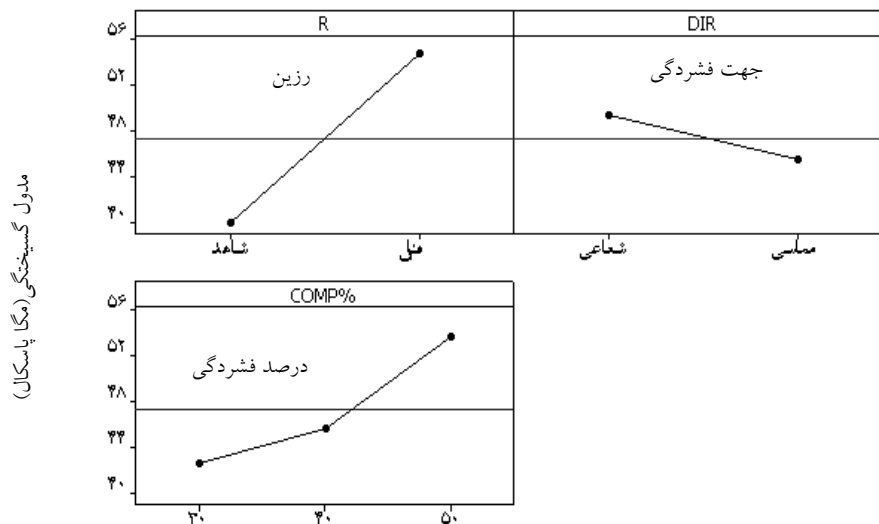
بررسی اثرگذاری های مستقل عامل های آزمایشی بر مدول گسیختگی پالونیا

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر مستقل رزین، درصد و جهت فشردگی در سطح ۵ درصد بر مدول گسیختگی معنادار است (جدول ۴). نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که نمونه‌های تیمار شده با رزین فنل فرمالدئید نسبت به نمونه‌های شاهد بیشترین مدول گسیختگی را دارند. با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۴ اثر مستقل جهت فشردگی بر مدول گسیختگی در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار شده است. همان طور که از نمودار شکل ۵ الف بر می‌آید فشردگی در جهت شعاعی منجر به بهبود مدول گسیختگی در نمونه‌ها می‌شود. مدول گسیختگی در هر دو جهت فشردگی در مقایسه با نمونه-

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس متغیرها بر مدول گسیختگی

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	P
رزین	۳۳۴۰/۲۷	۳۷۹/۱۹	۰/۰۰۰*
جهت فشردگی	۲۳۸/۶۸	۲۷/۱۰	۰/۰۰۰*
درصد فشردگی	۶۶۸/۳۶	۷۵/۸۷	۰/۰۰۰*
رزین × جهت فشردگی	۱۶/۲۲	۱/۸۴	۰/۱۸۱
رزین × درصد فشردگی	۱۱۴/۰۹	۱۲/۹۵	۰/۰۰۰*
جهت × درصد فشردگی	۴۹/۸۴	۵/۶۶	۰/۰۰۶

\* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

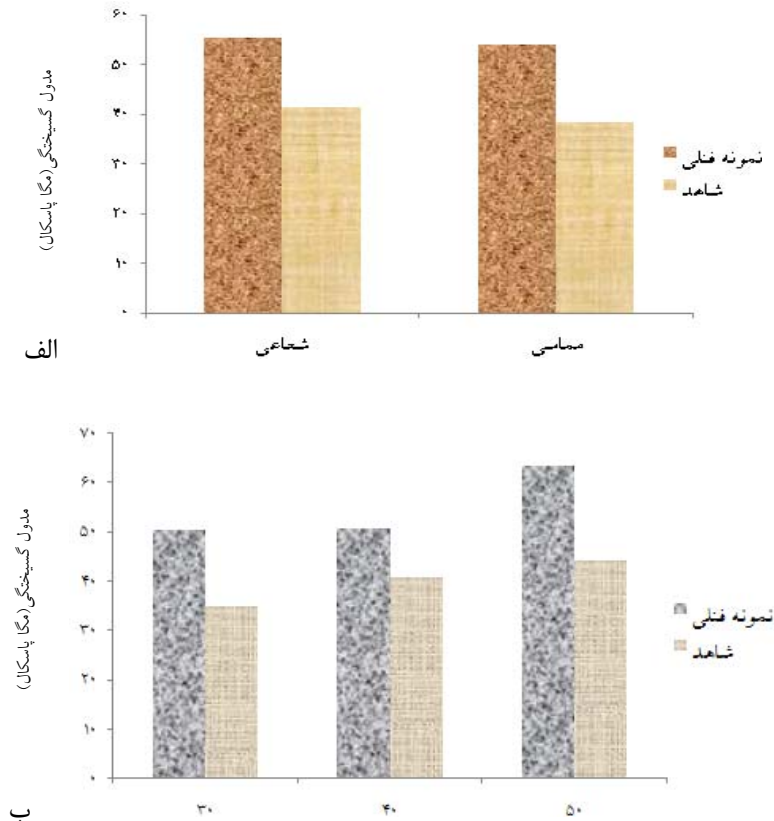


شکل ۴- نمودار اثرگذاری های مستقل متغیرها بر مدول گسیختگی

جدول ۵- گروه‌بندی دانکن برای مدول گسیختگی

گروه‌بندی	تعداد	درصد فشردگی
۳	۲۰	۳۰
۲	۲۰	۴۰
۱	۲۰	۵۰
۴۲/۵۶۴۳		
۴۵/۶۹۲۶		
۵۶/۷۶۷۷		





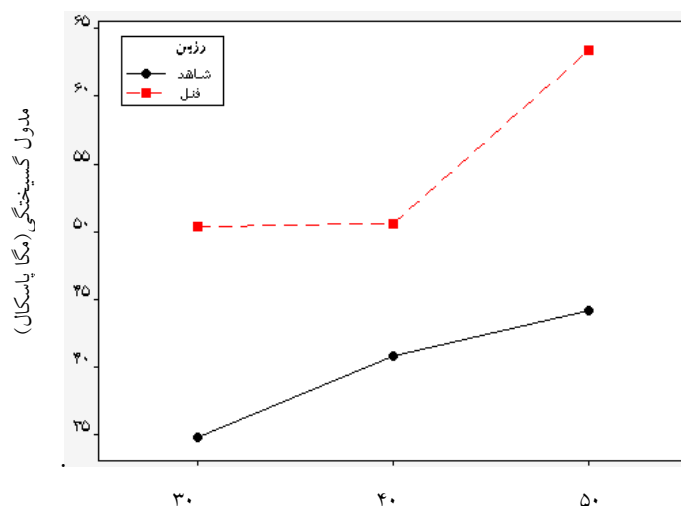
شکل ۵- میانگین مدول گسیختگی میانگین در نمونه‌های تیمار شده و شاهد در الف) دو جهت فشردگی و ب) سه درصد فشردگی

ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در حالی که این افزایش در ۵۰ درصد اندک بوده است. در نمونه‌های شاهد نیز افزایش درصد فشردگی موجب افزایش مدول گسیختگی شده است. به طور کلی افزایش درصد فشردگی در نمونه‌های فنل فرمالدئید، بالاترین میزان مدول گسیختگی را در میان نمونه‌ها به همراه داشته است.

افزایش این متغیر موجب افزایش چگالی شده و از آن جایی که بیشتر ویژگی‌های مکانیکی چوب از جمله مدول گسیختگی ارتباط مستقیمی با چگالی دارند، بنابراین مدول گسیختگی نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۵ ب میانگین مدول گسیختگی در درصدهای مختلف فشردگی آمده است. مدول گسیختگی در درصد فشردگی ۵۰ بیشترین مقدار (۶۳/۴۲ مگاپاسکال) را در نمونه‌ها دارد.

#### - بررسی اثرگذاری‌های متقابل بر مدول گسیختگی پالونیا

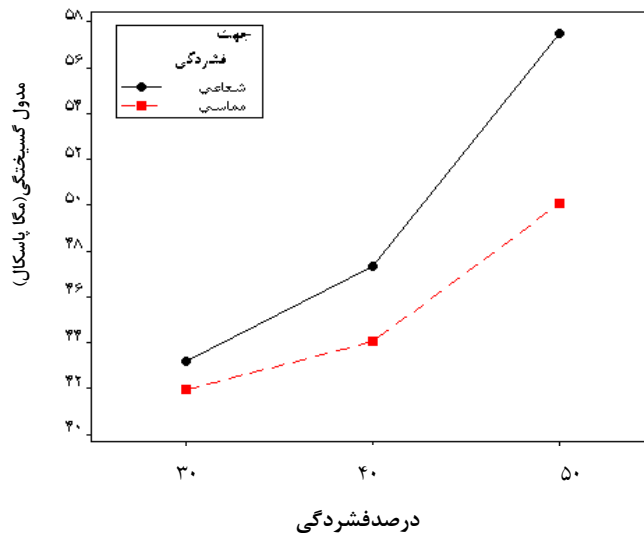
نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثرگذاری‌های متقابل رزین و درصد فشردگی، جهت و درصد فشردگی در سطح ۵ درصد بر مدول گسیختگی معنی‌دار است (جدول ۴). نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که در نمونه‌های اشباع شده با رزین فنل فرمالدئید با افزایش درصد فشردگی از ۴۰ به ۵۰ درصد مدول گسیختگی به میزان قابل



شکل ۶- نمودار اثرگذاری های متقابل متغیر رزین و درصد فشردگی بر مدول گسیختگی

شعاعی فشرده شدند به طور معنی‌داری بیشتر از نمونه‌های همانندی است که در جهت مماسی فشرده شدند. مدول گسیختگی نمونه‌هایی که تا ۵۰ درصد در جهت شعاعی فشرده شدند به میزان قابل توجهی از دیگر نمونه‌ها بیشتر است (شکل ۷).

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که در هر دو جهت شعاعی و مماسی با افزایش درصد فشردگی، مدول گسیختگی نمونه‌ها به طور معناداری افزایش می‌یابد که این به دلیل افزایش معنادار چگالی است. در هر سه سطح فشردگی، مدول گسیختگی نمونه‌هایی که در جهت



شکل ۷- نمودار اثرگذاری های متقابل متغیر جهت و درصد فشردگی بر مدول گسیختگی

معنادار است (جدول ۶) و اثرگذاری های متقابل تأثیر معناداری بر مدول کشسانی ندارند.

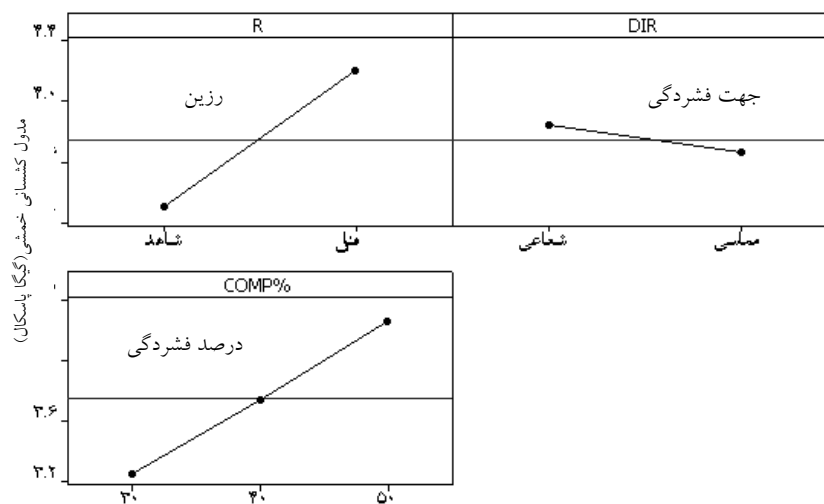
#### اثر متغیرها بر مدول کشسانی

- بررسی اثرگذاری های مستقل بر مدول کشسانی  
نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر مستقل رزین و درصد فشردگی بر مدول کشسانی در سطح ۵ درصد

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس متغیرها بر مدول کشسانی

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	P
رزین	۱۲/۱۹۵۶	۱۸/۵۰	۰/۰۰۰*
جهت فشردگی	۰/۴۷۹۴	۰/۷۳	۰/۳۹۸
درصد فشردگی	۵/۰۳۵۸	۷/۶۴	۰/۰۰۱*
رزین × جهت فشردگی	۰/۱۳۸۲	۰/۲۱	۰/۶۴۹
رزین × درصد فشردگی	۰/۷۵۰	۰/۱۱	۰/۸۹۳
جهت × درصد فشردگی	۰/۳۰۵۹	۰/۴۶	۰/۶۳۲

\* معنی داری در سطح ۰/۰۵

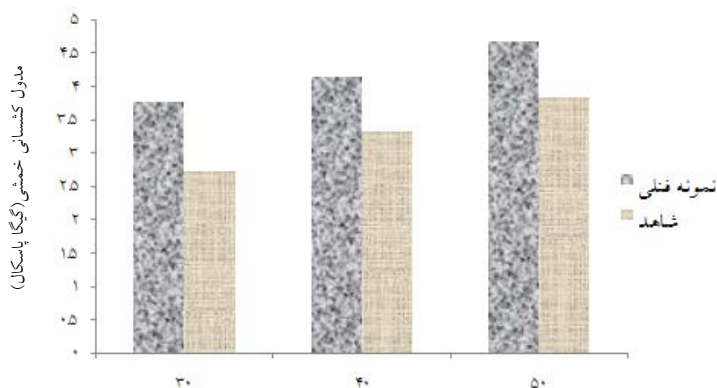


شکل ۸- نمودار اثرگذاری های مستقل متغیرها بر مدول کشسانی

فشار موازی الیاف، گروه دوم با درصد فشردگی ۵۰ بیشترین میزان مدول کشسانی را دارا هستند (جدول ۷). در بررسی های انجام شده بر روی فشرده سازی چوب، شمس و یانو (۲۰۰۹)، گابریلی و کامکه (۲۰۰۹)، به افزایش مدول الاستیسیته دست یافتند و آن را نتیجه افزایش کشسانی می دانستند.

در یک بررسی فاکوتا و همکاران (۲۰۰۷) بر روی فشردگی سدر ژاپن انجام دادند، دریافتند که مدول گسیختگی و کشسانی با افزایش درصد فشردگی افزایش می یابد و تا حدودی متناسب با افزایش چگالی است که با نتایج این بررسی همخوانی دارد.

بررسی نمودار شکل ۸ نشان می دهد که نمونه های اشباع شده با رزین فنل فرمالدئید بیشترین میزان مدول کشسانی خمشی را در میان نمونه ها دارند. اثر مستقل درصد فشردگی نیز بر مدول کشسانی در سطح ۵ درصد معنی دار شده است. افزایش درصد فشردگی موجب بهبود مدول الاستیسیته خمشی شده است. نمودار ۹ میانگین مدول کشسانی خمشی را در نمونه های شاهد و تیمار شده نشان می دهد. در همه درصدهای فشردگی در نمونه های تیمار شده مدول کشسانی بیشتر از نمونه های شاهد است. این می تواند به دلیل مدول کشسانی بالای رزین پلیمر شده در چوب پالونیا باشد که منجر به افزایش این ویژگی شده است. با بررسی نتایج آزمون دانکن از نظر درصد فشردگی، دو گروه مشخص شده است. گروه اول با درصد فشردگی ۳۰ و ۴۰ با کمترین میزان مقاومت به



شکل ۹- میانگین مدول کشسانی در نمونه‌های تیمار شده و شاهد در سه درصد فشرده‌گی

جدول ۷- گروه‌بندی دانکن برای مدول کشسانی خمشی

گروه‌بندی	شمار	درصد فشرده‌گی	
		۳	۲
۱	۲۰	۳/۲۵۳۳	۳۰
۲	۲۰	۳/۷۳۵۰	۴۰
۳	۲۰	۴/۲۵۶۶	۵۰

۱۰ نشان می‌دهد که نمونه‌های تیمار شده با رزین فنل- فرمالدئید در مقایسه با نمونه‌های شاهد از مقاومت به فشار موازی الیاف بیشتری برخوردارند. با ورود مونومر به درون چوب و تبدیل آن به پلیمر مقاومت فشار موازی الیاف در نتیجه استحکام دیواره سلولی، افزایش می‌یابد (امیدوار، ۱۳۸۸). نتایج این بررسی با تحقیقات شمس و همکاران (۲۰۰۶) و رودریگز و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد.

#### اثر متغیرها بر مقاومت فشار موازی الیاف

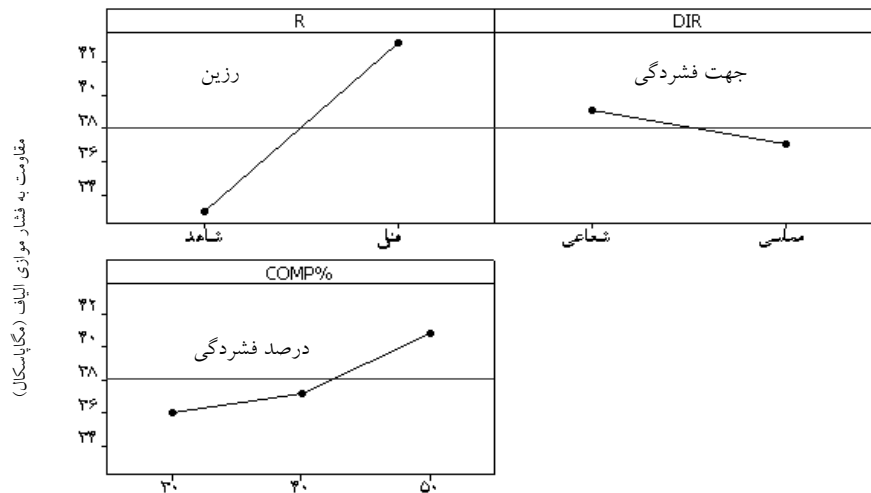
بررسی اثرگذاری های مستقل بر مقاومت فشار موازی الیاف پالونیا

در جدول ۸ که مقادیر مربوط به مجموع مربعات و سطوح معناداری در ۵ درصد آمده‌است اثر عامل های متغیر بر مقاومت به فشار موازی الیاف را نشان می‌دهد. اثر مستقل رزین، درصد و جهت فشرده‌گی بر مقاومت فشار موازی الیاف معنی‌دار است. نتایج تجزیه واریانس و نمودار شکل

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس متغیرها بر مقاومت فشار موازی الیاف

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	P
رزین	۱۵۸۸/۳۹	۱۳۸/۶۶	۰/۰۰۰*
جهت فشرده‌گی	۶۰/۷۹	۵/۳۱	۰/۰۲۶*
درصد فشرده‌گی	۱۲۵/۹۰	۱۰/۹۹	۰/۰۰۰*
رزین × جهت فشرده‌گی	۲۰/۱۸	۱/۷۶	۰/۱۹۱
رزین × درصد فشرده‌گی	۰/۸۳	۰/۰۷	۰/۹۳۰
جهت × درصد فشرده‌گی	۳/۸۶	۰/۳۴	۰/۷۱۶

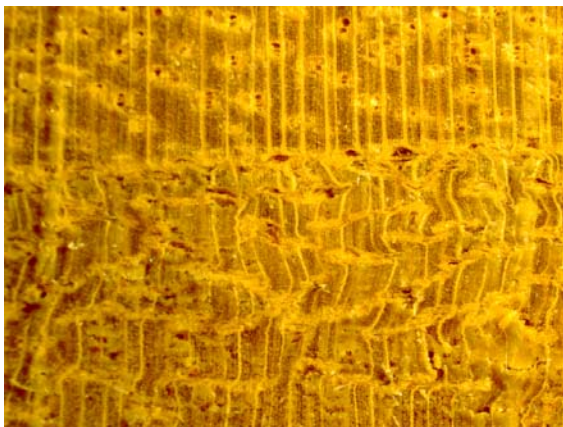
\* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵



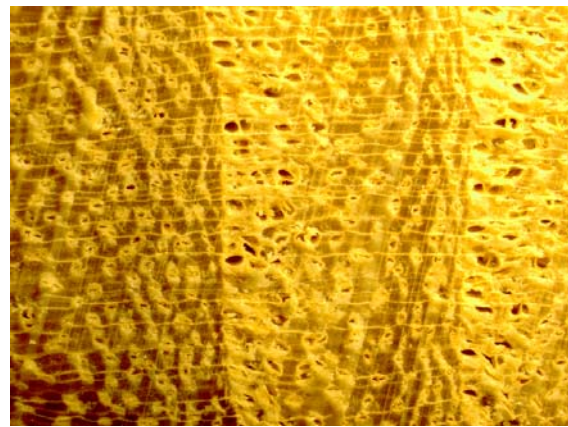
شکل ۱۰- نمودار اثرگذاری های مستقل متغیرها بر مقاومت به فشار موازی الیاف

سطح مقطع جدار سلول به سطح مقطع کل سلول، در نتیجه مقاومت چوب افزایش می‌یابد. با توجه به بررسی های میکروسکوپی در فشردگی پالونیا در جهت شعاعی، چوب بهاره بیشتر از چوب پاییزه فشرده می‌شود و سلول‌ها در جهت اعمال نیرو متراکم می‌شوند. اما در جهت مماسی سلول‌ها تحت بار فشار موازی الیاف دچار کماتش و تغییر شکل برشی می‌شوند که همین امر می‌تواند سبب کمتر شدن مقاومت به فشار موازی الیاف در جهت مماسی شود (شکل های ۱۰ الف و ب).

نتایج مقایسه اثر مستقل سطوح جهت فشردگی نشان می‌دهد که فشار موازی الیاف در نمونه‌های فشرده شده در جهت شعاعی به طور معناداری بیشتر از نمونه‌های فشرده شده در جهت مماسی است. چوب پالونیا به دلیل ساختار نیمه بخش‌روزنه‌ای از دو قسمت چوب بهاره و پاییزه تشکیل شده است که سلول‌های این دو ناحیه از لحاظ ساختاری (آناتومیکی) متفاوت‌اند و به خاطر این تفاوت چوب بهاره و پاییزه تحت بار موازی با الیاف رفتار متمایزی از یکدیگر نشان می‌دهند (بادیگ و جین، ۱۹۸۲). در هنگام فشرده‌سازی به دلیل افزایش نسبت



ب

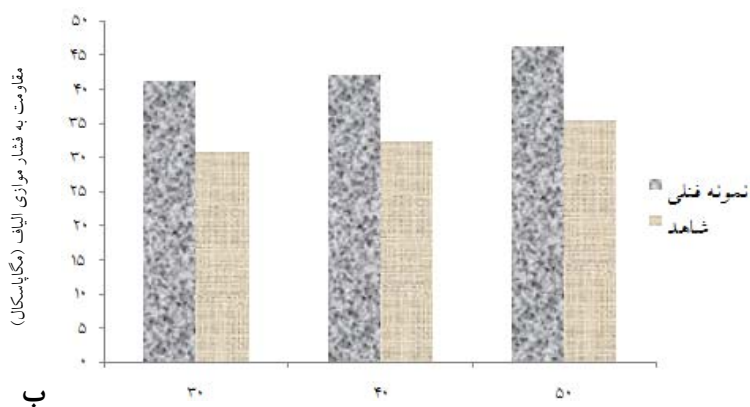
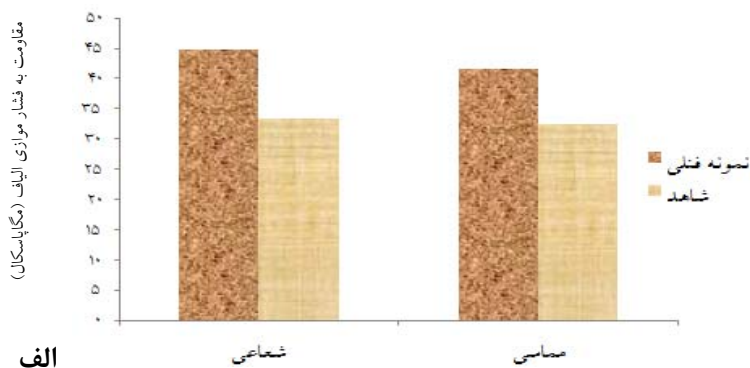


الف

شکل ۱۱- فشردگی چوب پالونیا در جهت الف: مماسی و ب: شعاعی

بهبود این ویژگی مکانیکی شده است. از سوی دیگر این نمودار نشان می‌دهد که مقاومت به فشار در جهت شعاعی برابر شکل ۱۲ الف بیشتر از جهت مماسی است.

نتایج داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین مقاومت به فشار در جهت شعاعی و مماسی در نمونه‌های تیمار شده بیشتر است و این مبین آن است که تیمار با رزین منجر به



شکل ۱۲- میانگین مقاومت به فشار موازی الیاف در نمونه‌های تیمار شده و شاهد در الف) دو جهت فشردگی و ب) سه درصد فشردگی

این امر نشان می‌دهد که تیمار با رزین فنل‌فرمالدئید اثر افزایشی در مقاومت به فشار موازی الیاف دارد و آن را بهبود می‌بخشد.

با بررسی نتایج آزمون دانکن از نظر درصد فشردگی، دو گروه مشخص شده است. گروه اول با درصد فشردگی ۳۰ و ۴۰ با کمترین میزان مقاومت به فشار موازی الیاف، گروه دوم با درصد فشردگی ۵۰ با بیشترین میزان مقاومت به فشار موازی الیاف هستند. بنابراین مقاومت به فشار موازی الیاف در درصد فشردگی ۳۰ و ۴۰ تفاوتی ندارد (جدول ۹).

در تحلیل اثر مستقل درصد فشردگی می‌توان به این نکته اشاره کرد که افزایش چگالی منجر به افزایش مقاومت به فشار موازی الیاف در نمونه‌های تیمار شده است. شکل ۱۲ ب میانگین مقاومت به فشار موازی الیاف را در نمونه‌های تیمار شده و شاهد نشان می‌دهد. با افزایش درصد فشردگی مقاومت به فشار موازی الیاف روند صعودی می‌یابد و در فشردگی ۵۰ درصد به بیشترین میزان می‌رسد. در نمونه‌های تیمار شده با رزین در مقایسه با شاهد در بالاترین درصد فشردگی، مقاومت به فشار نیز بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است.

جدول ۹- گروه‌بندی دانکن برای مقاومت به فشار موازی الیاف

گروه‌بندی			تعداد	درصد فشردگی
۳	۲	۱		
		۳۶/۰۵۵۱	۲۰	۳۰
		۳۷/۲۳۱۱	۲۰	۴۰
		۴۰/۸۶۷۹	۲۰	۵۰

## منابع

- Blomberg, J., presson, B., and blomberg, B. 2005. Effect of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *J. Wood science and technology*.39:339-350.
- Bodig, J., and Jayne, BA. 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reynold Compony, New York. ISBN o44200822 8.
- Dwainto, w., Inoue, M., and Norimoto, M, 1997. Fixation of deformation of wood by heat treatment. *J. Makuzai Gakkaishi*. 43(4):303-309.
- Fukuta, S., Takasu, Y., Sasaki., and Hirashima., Y. 2007. Compressive Deformation Process of Japanese Cedar (*Cryptomeria Japonica*). *J. wood and fiber science*. 39(4): 548-555.
- Gabrielli, C.P., Kamke, F.A. 2009. Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *J. wood science and technology*. DIO 10.1007/s00226-009-0253-6.
- Heger, F., Giroux , M., Welzbacher, C., Rapp, A.O., and Navi, P. 2004. Mechanical and durability performance of THM-densified wood. Final workshop cost action “environmental optimization of wood protection”. Lisbon- Portugal, 22<sup>nd</sup>-23<sup>rd</sup> march 2004.
- Ito, Y., Tanahashi, M., Shigematesu, M., and shinoda, Y. 1998a:Compressive-molding of wood by high-pressure steam-treatment: Development of compressive molded squares from thinnings. *J. Holzforchung*. 52(2):211-216.
- Jennings, J.D. 2003. Investigation the surface energy and bond performance of compression densified wood, Msc thesis, Virginia polymeric institute and state university:147.
- kamke, F.A. 2006. Densified Radiata Pine for structural composites. *Mederas, Ciencia Y Tecnologia*.8(2):83-92.
- Kollman, F.P., kuenzi, E.W., and Stamm, A.J. 1975. *Principle of wood science and Technology*, vol 2. Wood based materials, 1st Edition, Springer-verlag Newyork, Heidelberg, Berlin: 703.
- Navi, P., and Girardet, F. 2000. Effects of thermo- hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *J. Holzforchung*.54(3):287-293.
- Omidvar, A. 2009. wood-polymer composites. publication of agricultural and natural resources of Gorgan university. 120 pages (in persian).
- Rodrigues, W., Spinosa, M.M., and Polito, W.L. 2005. Comparison of the compressive strength of impregnated and nonimpregnated Eucalyptus subjected to two different pressures and impregnation times. *J. material research*.7(2).
- Rowell, R.M., and Konkol, P. 1987. Treatment that enhance physical properties of wood. *Gen.Tech.Rep.FPL-GTR-55*. Madison, WI: us. Development of agriculture, Forest service, Forest products laboratory.12 pages.
- Shams, M.D., and Yano, H. 2009. A new method for obtaining high strength PF resin impregnated wood composites at low pressing pressure. *J. tropical forest science*. 21(2):175-180.
- Shams, M.D., Kagemori, N., Yano, H. 2006. Compressive deformation of wood impregnation with low molecular weight phenol-formaldehyde (PF) VI: Species dependency. *J. wood science*. 52:179-183.
- Wood- determination of ultimate in static bending. Ref. No. Iso 3133- 1975-(E). First Edition-1975-11-01
- Wood- Test method- Determination of ultimate Stress in Compression Parallel to Grain. Ref. No. Iso 3787- 1976- (E). First Edition-1975-09-30
- Wood- Test method- Determination of ultimate impact strength. Ref. No. EB 23-94B- 1980.

## The Effect of Chemical Modification with Phenol Formaldehyde and Compression on Mechanical Properties of Paulownia (*P.fortunie*) Wood

M. Sekaloo<sup>\*1</sup> and A. Khazaiean<sup>2</sup>

### Abstract

Shortages of raw wood materials and increasing demand for this raw material, has created challenges for wood working industries. These situation makes wood industries to use wood of fast growing species, such as Paulownia. Expanding plantations of paulownia is a feasible solution, but this species owns a low specific gravity and mechanical properties as well. In this research effects of compreg- impregnated (by phenol for maldehyde resin) treatment on improving mechanical properties of paulownia was studied. Test materials were compressed in tangential and radial directions by 3, 30, 40 and 50 percent at 170 °c temperature for 12 minute. Specimens were cut from treated test materials and tested according to Iso-3133 & 3787. Result have shown that resin treatment improves all mechanical properties except toughness. Control specomens had higher toughness as compared with treated ones. MOE and MOR did increase, and turned to be highest specomens compressed 50 % in redial direction.

**Keywords:** Paulownia fortunei, Urea formaldehyde, Modulus of rapture, Modulus of elasticity, Densification

---

\* Corresponding author: Email: m\_woodthec@yahoo.com