



## Possibility of producing wooden objects by pressure molding through treatment with hydrogen peroxide and hygrothermal treatment

Arash Khodadadi<sup>1</sup>, Davood Efhamisi<sup>2\*</sup>, Hadi Gholamian<sup>3</sup>, Reza Hosseinpourpia<sup>4</sup>, Reza Oladi<sup>3</sup> and Fatemeh Ghasemi<sup>5</sup>

- 1- Ph. D. Candidate of Wood Preservation and Modification, University of Tehran
- 2- Corresponding author, Assistance Professor, Department of wood and paper science technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [efhami@ut.ac.ir](mailto:efhami@ut.ac.ir)
- 3- Associate Professor, Department of wood and paper science technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- 4- Associate Professor, Department of Wood and Forest Technology, University of Linnaeus, Sweden
- 5- M.S in Polymer Chemistry University of Isfahan. Isfahan, Iran

Received: Febreoury 2024

Accepted: September 2024

### Abstract

**Problem definition and objectives:** The processes of producing wooden products are not so diversative like the ones used for metals and plastics and usually have large amount of waste. Molding is one of the most commonly used methods by manufacturers of metal and plastic products. Molding is one of the methods that reduce waste and costs and at the same time increases the efficiency and production speed. In this context, the use of molding for wooden products seems somewhat unlikely due to the physical properties of wood. Wood does not melt from heat, and it cannot easily be shaped within a mold. The aim of this study is to investigate the mass production of wooden components using the compression molding method with poplar wood species.

**Methodology:** This research was conducted in four main stages: initial chemical treatment, thermal steam treatment, mold shaping, and final thermal treatment to stabilize the shape. The chemical treatment with hydrogen peroxide was used to relatively remove lignin and initially soften the wood texture. To this end, the samples were saturated with hydrogen peroxide under vacuum and pressure at different time intervals. The amount of lignin removal was assessed using microscopic studies and infrared spectroscopy. In the next stage, to enhance flexibility and facilitate easier molding, the saturated samples were subjected to hygrothermal treatment at 180°C for three hours. A controlled temperature hot mold was utilized to create the final product in the shape of a small container. During molding, the temperature was set at 180°C. In the final stage, after shaping, the formed wooden product was kept in the mold at same temperature for an additional two hours to ensure drying and stabilization of its dimensions. Finally, some physical properties of the formed product were studied.

**Results:** The obtained results confirmed that there is a possibility of producing formed wood pieces using this method. Microscopic studies also showed that treatment with hydrogen peroxide leads to the relative removal of lignin from the wood. These results

were also supported by data from infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis. The dry density of the control poplar wood was  $\pm 0.41 \text{ g/cm}^3$ , which increased to  $\pm 0.57 \text{ g/cm}^3$  due to processing. Water absorption in the shaped samples was very rapid during the first two hours of immersion in water, but it then decreased and showed little change over the following 144 hours. The maximum water absorption of these samples after six days of immersion in water was 32% less than that of the control sample. The pattern of dimensional changes of the samples obtained from molded pieces was also different from that of the control poplar wood in various directions. The maximum transverse shrinkage of the molded samples was 19.3% less than that of the control poplar wood. On the other hand, the differences in shrinkage in width and thickness of the molded samples were much less than those of the control sample.

**Conclusion:** Although the results of this research were promising for the mass production of wooden subjects using the compression molding method, there are cracks on the final product that require further studies for resolution. The chemical treatment of wood with hydrogen peroxide and steam heating treatment provides the capability for softening the wood texture and shaping it within the mold. According to the results of this study, waste wood from sawmills and furniture factories, which cannot be used due to its small size, can be utilized for the mass production of wooden products without the need for shredding.

**Keywords:** Compression molding, Hydrogen peroxide, Hygrothermal treatment, hot mold, Lignin.

## امکان تولید قطعات چوبی به روش قالب گیری فشاری از طریق تیمار شیمیایی با پراکسید هیدروژن و بخار گرمایی

آرش خدادادی<sup>۱</sup>، داود افهامی سیسی<sup>۲\*</sup>، هادی غلامیان<sup>۳</sup>، رضا حسین پورپیا<sup>۴</sup>، رضا اولادی<sup>۲</sup>، فاطمه قاسمی<sup>۵</sup>

۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: [efhami@ut.ac.ir](mailto:efhami@ut.ac.ir)

۳- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- دانشیار گروه تکنولوژی چوب و جنگل، دانشگاه لینه، سوئد.

۵- دانش آموخته کارشناسی ارشد شیمی پلیمر دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** بیان مسئله و اهداف: فرآیند ساخت محصولات چوبی بر خلاف سایر مواد مانند فلز و پلاستیک چندان متنوع نبوده و با حجم زیادی از ضایعات و دور ریز همراه است. قالب گیری یکی از پرکاربردترین روش‌هایی است که تولیدکنندگان محصولات فلزی و پلاستیکی از آن استفاده می‌کنند. قالب گیری در کنار راندمان و سرعت بالایی تولید باعث دور ریز کمی شده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در این میان استفاده از قالب گیری برای محصولات چوبی با توجه خواص فیزیکی چوب کمی دور از ذهن به نظر می‌رسد. چوب در اثر حرارت ذوب نمی‌شود و نمی‌توان آن را به راحتی داخل قالب شکل داد. هدف از این مطالعه، بررسی تولید انبوه قطعات چوبی با استفاده از روش قالب گیری فشاری و با استفاده از گونه چوب صنوبر است.

**مواد و روشها:** این پژوهش در چهار مرحله اصلی شامل: تیمار شیمیایی اولیه، تیمار بخار گرمایی، شکل دهی درون قالب و تیمار حرارتی نهایی به منظور تثبیت شکل انجام شد. از تیمار شیمیایی با پراکسید هیدروژن برای خروج نسبی لیگنین و نرم کردن اولیه بافت چوب استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها در دوره های زمانی مختلف با پراکسید هیدروژن با کمک خلاء و فشار اشباع شدند. سپس میزان خروج لیگنین با مطالعات میکروسکوپی و طیف سنجی مادون قرمز بررسی شد. در مرحله بعدی، برای افزایش انعطاف پذیری و قالب گیری آسان تر، نمونه‌های اشباع شده به مدت سه ساعت ۳۳۳ تحت تیمار بخار گرمایی در دمای 180 °C قرار گرفتند. قالب به کار رفته در این تحقیق از نوع گرم با قابلیت کنترل دما بود که برای تولید محصول نهایی به شکل یک ظرف کوچک طراحی شده بود. در این فرآیند، دمای قالب 180 °C سانتی‌گراد تنظیم شده بود. در مرحله نهایی پس از شکل گیری چوب، بمحصول شکل یافته به مدت دو ساعت دیگر در دمای 180 °C داخل قالب باقی ماند تا ضمن خشک شدن، ابعاد آن تثبیت شود. در پایان برخی ویژگی‌های فیزیکی بدنه محصول شکل یافته مورد مطالعه قرار گرفت.

**نتایج:** نتایج به دست آمده تایید کرد، امکان تولید قطعات شکل یافته از چوب با استفاده از این روش وجود دارد. مطالعات میکروسکوپی نیز نشان داد، تیمار با پراکسید هیدروژن باعث خروج نسبی لیگنین از چوب می‌شود. این نتایج با داده‌های طیف سنجی مادون قرمز و گرماسنجی وزنی نیز تایید شد. دانسیته خشک چوب شاهد صنوبر 1 g.cm-1 ± 0/04 ± 0/41 بود که در اثر فرآوری دانسیته آن به 1 g.cm-1 ± 0/01 ± 0/57 افزایش یافت. جذب آب در نمونه‌های شکل دهی شده طی دو ساعت اول غوطه‌وری در آب سیار سریع بود اما پس از آن کاهش یافته و طی ۱۴۴ ساعت بعدی تغییر چندانی نداشت. حداکثر میزان جذب آب این نمونه‌ها پس از ۶ روز غوطه‌وری در آب نسبت به نمونه شاهد ۳۲ درصد کمتر بود.

الگوی تغییرات واکسیدگی نمونه های بدست آمده از قطعات قالب گیری شده نیز متفاوت از چوب شاهد صنوبر در جهت های مختلف بود. حداکثر مقدار همکشیدهگی عرضی نمونه های قالب گیری شده ۱۹/۳ درصد کمتر از چوب شاهد صنوبر بود. از طرفی تفاوت همکشیدهگی در عرض و ضخامت نمونه های قالب گیری شده بسیار کمتر از نمونه شاهد بود.

**نتیجه گیری:** اگرچه نتایج این تحقیق برای تولید انبوه قطعات چوبی با روش قالب گیری فشاری امیدبخش بود اما ترک هایی بر روی محصول نهایی وجود دارد که برای برطرف کردن آنها نیاز به مطالعات بیشتری است. تیمار شیمیایی چوب با پراکسید هیدروژن و تیمار بخار گرمایی امکان نرم کردن بافت چوب و شکل گیری آن داخل قالب را مهیا می سازد. طبق نتایج این تحقیق می توان از ضایعات چوبی کارخانه های چوب بری و میلمان که به علت کوچکی امکان استفاده ندارند، برای تولید انبوه محصولات چوبی بدون نیاز به خرد کردن آنها استفاده کرد.

**واژه های کلیدی:** قالب گیری فشاری، پراکسید هیدروژن، بخار گرمایی، قالب گرم، لیگنین.

## مقدمه

تولیدکنندگان همواره به دنبال یافتن روش های جدیدی برای ساخت سریع تر و کم هزینه تر محصولات خود هستند. قالب گیری یکی از پرکاربردترین روش هایی است که تولیدکنندگان محصولات فلزی و پلاستیکی از آن استفاده می کنند. استفاده از قالب، دور ریز را به حداقل رسانده و ضمن کاهش هزینه و بالا بردن سرعت تولید، یکنواختی محصولات تولید شده را تامین می نماید [۱]. در این میان استفاده از قالب گیری برای محصولات چوبی با توجه خواص فیزیکی چوب کمی دور از ذهن به نظر می رسد. چوب در اثر حرارت ذوب نمی شود و نمی توان آن را به راحتی داخل قالب شکل داد. برای حل این مشکل، محققین و تولیدکنندگان به استفاده از خرده های چوب روی آورده اند که معمولاً با استفاده از چسب داخل قالب قرار گرفته و به شکل دلخواه در می آید. اما هنوز استفاده از چوب ماسیو و شکل دهی آن درون قالب چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق به دنبال آن هستیم که یک نمونه چوب ماسیو را پس از تیمار شیمیایی و بخار گرمایی نرم و منعطف کرده تا امکان قالب گیری فشاری آن مهیا شو چوب یک زیست بسپار طبیعی است که از سه ماده اصلی سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده است. این سه ماده ساختار دیواره سلولزی را تشکیل داده و نهایتاً تجمع این سلول ها در کنار یکدیگر چوب را تشکیل

می دهند [۲] به این ترتیب ساختار مرفولوژی چوب بسیار پیچیده تر از آلیاژهای فلزی، پلاستیک ها و حتی مواد کامپوزیتی جدید است. اما اگر بتوان به نحوی چوب را به حالت منعطف و نرم درآورد می توان از بسیاری روش های دیگر برای شکل دادن چوب استفاده کرد. پلیمرهای چوب در دماهای بالاتر از  $150^{\circ}\text{C}$  شروع به تجزیه شدن می کنند [۲] و با بالاتر رفتن دما، تجزیه پلیمرها سرعت و ابعاد بزرگتری پیدا کرده تا جایی که به از بین رفتن کامل چوب منجر می شود. به این ترتیب چوب را صرفاً با اعمال حرارت نمی توان ذوب کرده یا به شکل خمیری در آورد. اما می توان با ترکیب راه های مختلف تا حدودی بر این مشکل غلبه کرد. یکی از این راه ها عبور از دمای گذار شیشه ای لیگنین (دمایی که در بالای آن ماده از حالت شکننده به حالت چکش خوار تبدیل می شود) است. لیگنین بر خلاف ترکیبات پلی ساکاریدی چوب، ساختار آمورف و سه بعدی داشته و یک پلی فنل ترموپلاستیک است [۳]. پژوهشگران در تحقیقات خود اعداد مختلفی را برای دمای گذار شیشه ای لیگنین مطرح کرده اند. به عنوان مثال در یک تحقیق توسط لی و همکاران این عدد حدود  $150^{\circ}\text{C}$  اعلام شده است [۴]. اما برخی محققین آن را بسیار بالاتر دانسته و به عنوان مثال  $205^{\circ}\text{C}$  اعلام کرده اند [۵]. علت این امر آن است که دمای گذار شیشه ای لیگنین عدد ثابتی نیست و با تیمارهای مختلف می توان

<sup>3</sup> Glass Transition Temperature

<sup>4</sup> Ductile

<sup>1</sup> Hygrothermal

<sup>2</sup> Biopolymer

شکل اثر حافظه نیز گفته می‌شود که ساده‌ترین راه برای کاهش آن، تیمار حرارتی ثانویه است. به این صورت که نمونه شکل گرفته یا فشرده شده را تحت دمای  $180^{\circ}\text{C}$  تا  $200^{\circ}\text{C}$  قرار داده و این حرارت ضمن خشک کردن محصول، باعث ثبات تغییر شکل صورت گرفته می‌شود [۱۵]. همچنین به غیر از تیمارهای حرارتی می‌توان از تیمارهای شیمیایی مانند اسید مالئیک و گلیسرول برای کاهش اثر حافظه استفاده کرد [۱۵]. در این تحقیق امکان استفاده از قالب‌گیری فشاری برای ساخت قطعات چوبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این موضوع از تیمار شیمیایی با پراکسید هیدروژن برای نرم کردن بافت چوب و خروج جزئی لیگنین و در ادامه قالب‌گیری قطعه و در نهایت تیمار گرمایی برای تثبیت شکل استفاده خواهد شد. هدف اصلی این تحقیق امکان سنجی تولید عمده قطعات چوبی با استفاده از روش قالب‌گیری فشاری است. فرضیه اصلی این تحقیق امکان نرم کردن بافت چوب با تیمار شیمیایی به منظور قالب‌گیری فشاری با پرس گرم بود.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در چهار مرحله اصلی انجام شد: تیمار شیمیایی اولیه، تیمار بخار گرمایی، شکل‌دهی درون قالب و تیمار حرارتی نهایی به منظور تثبیت شکل.

### تیمار شیمیایی اولیه

در این تحقیق برای ساخت قطعات چوبی شکل یافته از چوب صنوبر (*Populus alba*) استفاده شد. این گونه چوبی به طور رایج در صنعت چوب کشور استفاده شده و ضایعات آنها با ابعاد و شکل‌های مختلف به آسانی قابل دسترسی است. برای نمونه‌گیری از درختان قطع شده در استان البرز استفاده شد.

برای تیمار شیمیایی با پراکسید هیدروژن، نمونه‌هایی به صورت  $16$  مکعب به ابعاد تقریبی  $3 \times 3 \times 3$  سانتی متر مکعب بریده شده و برای رسیدن به وزن خشک ابتدا به مدت  $24$  ساعت تحت دمای  $103^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته و سپس وزن ( $M_0$ ) و ابعاد آنها اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها با پراکسید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) تحت تیمار شیمیایی قرار

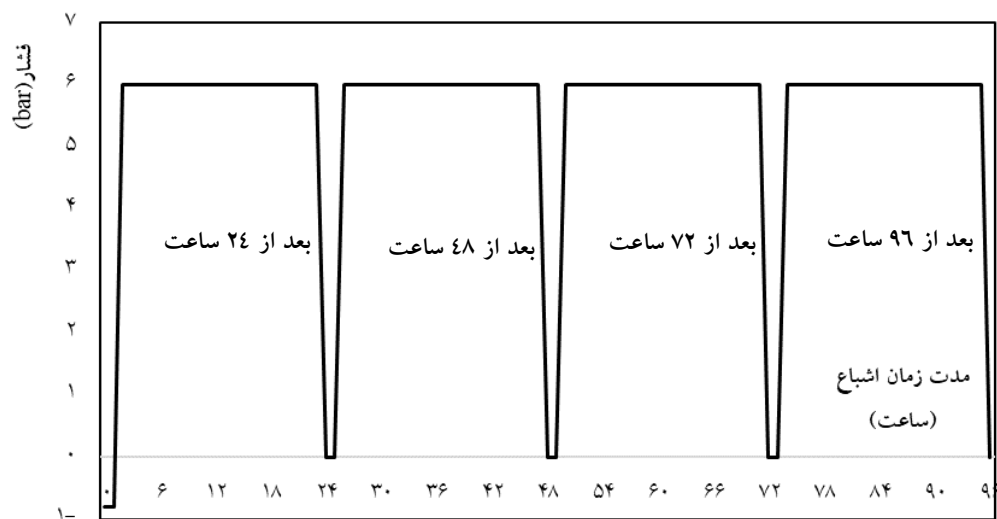
آن را تغییر داد. با افزایش رطوبت یا استفاده از مواد شیمیایی نرم کننده این دما قابل کاهش است [۶]. در برخی از تحقیقات، به استفاده از امواج مایکروویو برای پیش گرم کردن چوب قبل از تکنیک‌های خمکاری چوب اشاره شده است [۷]، [۸] راه دیگر استفاده از مواد نرم کننده چوب است. این مواد به سه روش باعث نرم شدن چوب می‌شوند. شیوه نخست، همانطور که ذکر شد پایین آوردن دمای گذار شیشه‌ای لیگنین است. معروفترین این مواد آب است که به صورت مایع یا بخار باعث نرم شدن چوب می‌شود. در روش دوم استفاده از مواد نرم کننده‌ای بر روی سطح چوب است که باعث خروج نسبی لیگنین و همی سلولزها از چوب شده و در نتیجه قابلیت شکل‌گیری چوب را افزایش می‌دهند [۹]، [۱۰] و نهایتاً در روش سوم این مواد با ترکیبات چوب واکنش نشان داده و باعث نرمی چوب می‌شوند. از معروفترین این مواد می‌توان به آمونیاک اشاره کرد. آمونیاک بدون آب می‌تواند به داخل شبکه کریستالی پلیمرهای چوب نفوذ کرده و سبب تخریب ساختار کریستالی آن‌ها و به این ترتیب، نرم شدن چوب شود [۱۱]. ماده دیگری که می‌تواند باعث لیگنین زدایی از چوب شود پراکسید هیدروژن یا آب اکسیژنه است. این ماده در کنار آمونیاک اثر هم‌افزایی بر تجزیه لیگنین دارد [۱۲]. همچنین تحقیقات نشان داده که تماس چهار روزه پراکسید هیدروژن با چوب باعث لیگنین زدایی از آن می‌شود [۱۳] در فرآیندهایی که به نام THM<sup>۵</sup> شناخته شده- اند آب و بخار آن به عنوان ماده نرم کننده به کار می‌روند. در این روش، چوب ابتدا تحت تیمار حرارتی تحت مجاورت بخار یا آب قرار گرفته و سپس داخل قالب قرار می‌گیرد. از این روش بیشتر برای فشرده سازی یا اصلاح سطح چوب استفاده می‌شود. بخار آب ضمن اینکه خود به عنوان نرم کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، عامل اصلی انتقال حرارت به چوب بوده و همچنین با پرکردن فضای اطراف چوب مانع از رسیدن اکسیژن به چوب و شعله‌ور شدن آن می‌شود [۱۴]. تحقیقات نشان داده پس از انجام عملیات شکل‌گیری یا فشرده‌سازی، نمونه اصلاح‌شده تمایل زیادی به برگشت به حالت اولیه دارد. به این تغییر

<sup>6</sup> Memory Effect

<sup>5</sup> Thermo-hydro-mechanical

اشباع و در معرض قرارگیری نمونه با محلول پراکسید هیدروژن هر ۲۴ ساعت ۴ نمونه از داخل مخزن اشباع خارج شد. این عمل تا ۹۶ ساعت ادامه یافت (شکل ۱). پس از هر مرحله وزن خیس (MI) نمونه‌های خارج شده، برای محاسبه درصد جذب محلول، طبق رابطه ۱، اندازه‌گیری شد.

$$Uptake \% = \left\{ \frac{(M_t - M_0)}{M_0} \right\} \times 100 \quad (1)$$



شکل ۱ - نمودار خلاء/فشار برای اشباع چوب با پراکسید هیدروژن طی یک دوره چهار روزه

آسترابلو دیواره‌های سلولی بدون لیگنین یا لیگنین‌زدایی شده را به رنگ آبی درمی‌آورد [۱۶]

آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه زیرقرمز<sup>۷</sup>

(FTIR) و وزن‌سنجی حرارتی<sup>۸</sup> (TGA)

این دو آزمون بر روی نمونه چوب صنوبر تیمار نشده و چوب صنوبر اشباع شده با پراکسید هیدروژن انجام شد. آزمون FTIR با استفاده از دستگاه مدل Equinox 55 ساخت شرکت Bruker آمریکا و در آزمایشگاه مرکزی پردیس علوم دانشگاه تهران انجام شد. اندازه‌گیری FTIR در دامنه عدد موجی  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  انجام شد.

آنالیز TGA نیز برای بررسی رفتار حرارتی چوب‌های تیمار شده و مقایسه با نمونه شاهد انجام شد. جهت انجام

گرفتند. پراکسید هیدروژن یا آب اکسیژنه استفاده شده در این تحقیق از نوع آزمایشگاهی و از مجتمع صنایع شیمیایی دکتر مجللی و با شماره CAS ۷۷۲۲-۸۴-۱ و خلوص ۳۷ درصد تهیه گردید. برای اطمینان از نفوذ کامل پراکسید هیدروژن به داخل نمونه‌ها از روش خلاء/فشار برای اشباع استفاده شد. برای یافتن مدت زمان بهینه

#### مطالعه میکروسکوپی نمونه‌های تیمار شده

با استفاده از میکروتوم GSL1، مقاطع نازکی به ضخامت ۱۰ میکرومتر از مقطع عرضی نمونه‌های شاهد و تیمار شده با پراکسید هیدروژن (پس از ۷۲ ساعت اشباع) برش داده شد. این مقاطع میکروسکوپی ابتدا بدون رنگ آمیزی زیر میکروسکوپ فلورسنس BEL-Fluo3 بررسی شدند. از آنجا که نمونه‌های تیمار شده زیر نور فرابنفش، درخشش بسیار اندکی داشته و قابل عکس‌برداری نبودند، از نور برانگیزاننده آبی در طیف ۴۲۰-۴۸۵ نانومتر استفاده شد. سپس، برخی از این مقاطع با محلول آبی ۱٪ سافرانین آسترابلو، رنگ‌آمیزی شده و زیر میکروسکوپ نوری زمینه روشن، عکسبرداری انجام شد. سافرانین مقاطع لیگنینی شده را به رنگ قرمز درآورده در حالی که

<sup>7</sup> Fourier Transform Infrared Spectroscopy

<sup>8</sup> Thermo Gravimetric Analysis

شد. به منظور بالا بردن مقاومت خوردگی در برابر دما و مواد شیمیایی پس از عملیات جوشکاری و تراشکاری، سطح مخزن با داکرومات<sup>۹</sup> پوشش داده شد. به منظور ایمنی بیشتر، تمام محاسبات مخزن تحت فشار بر اساس فشار ۲۰ اتمسفر صورت پذیرفت و حد تنش مجاز بر مبنای ضعیف ترین فولاد یعنی ST37 در نظر گرفته شد. نمونه‌های تیمار شده به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۸۰ °C سانتی‌گراد تحت تیمار بخار گرمایی قرار گرفتند. زمان تیمار بخار گرمایی با کمک آزمون‌های اولیه، برای رسیدن مغز چوب به دمای هدف تعیین شد. سپس نمونه‌ها داخل قالب قرار گرفته و فرایند شکل دهی صورت گرفت. برای شکل‌دهی نمونه‌ها در قالب از یک پرس هیدرولیک با قابلیت اعمال نیرو تا حداکثر ۱۵ تن استفاده شد.

#### شکل‌دهی درون قالب و تیمار حرارتی نهایی

قالب به کار رفته در این تحقیق از نوع قالب گرم با قابلیت کنترل دما بود و محصول نهایی به شکل یک ظرف کوچک طراحی شد که قطر دهانه و ارتفاع آن در حدود ۵ سانتی‌متر و ضخامت بدنه و کف آن به ترتیب در حدود ۳/۵ میلی‌متر و ۶ میلی‌متر بود. شکل ۲ شماتیک نحوه عملکرد قالب در طول فرایند را نشان می‌دهد.

در این فرایند، دمای قالب ۱۸۰ °C سانتی‌گراد تنظیم شده بود که از طریق ترموکوپل کار گذاشته شده در درون قالب اندازه‌گیری و کنترل می‌شد. پس از شکل‌گیری چوب در مرحله نهایی به منظور تثبیت شکل، محصول شکل گرفته به مدت دو ساعت دیگر در دمای ۱۸۰ °C داخل قالب باقی ماند تا ضمن خشک شدن، ابعاد آن تثبیت شود. در نهایت نمونه از قالب خارج شد تا نحوه شکل‌پذیری و ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی آن مورد بررسی قرار گیرد.

این آزمون از هر نمونه مقداری پودر تهیه شد. دستگاه مورد استفاده ساخت Linseis مدل STA PT 1600 بود. آزمون در دمای بیشینه ۶۰۰ °C و با نرخ حرارت‌دهی ۵ °C/min در محیط گاز نیتروژن انجام شد. ۱۰ میلی‌گرم از آرد مربوط به هر تیمار در محفظه دستگاه قرار داده شد. دستگاه، جرم نمونه در دماهای مختلف را ثبت کرده و در نهایت نمودار رسم شد.

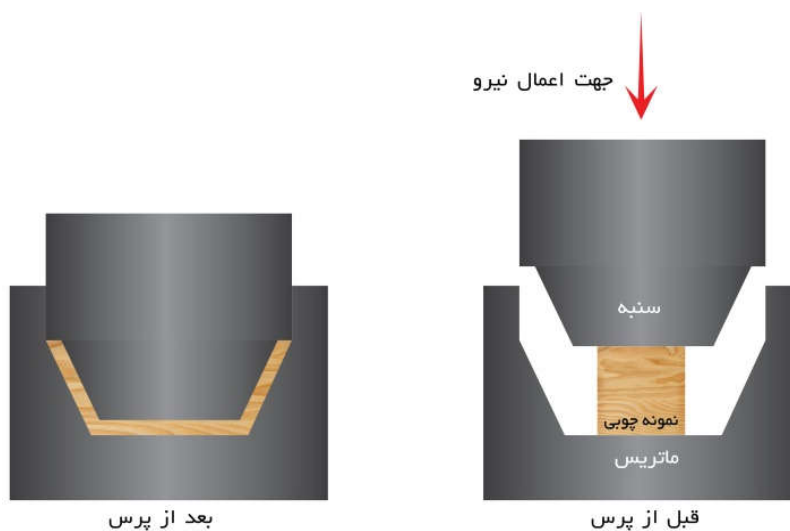
#### تیمار بخار گرمایی

پس از تیمار شیمیایی، نمونه‌ها تحت تیمار بخار گرمایی قرار گرفتند. تیمار بخار گرمایی یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های این تحقیق بود. هدف از این تیمار عبور از دمای شیشه‌ای شدن لیگنین به منظور خمیری شدن چوب بود. بر طبق آنچه در پیشینه تحقیق ذکر شد این دما بالاتر از ۱۵۰ °C است که در این تحقیق سطح دمایی ۱۸۰ °C مورد بررسی قرار گرفت.

از آنجا که این تیمار بلافاصله پس از تیمار شیمیایی و بر روی نمونه‌های اشباع شده صورت گرفت، لازم بود تیمار به گونه‌ای انجام گیرد که ماده شیمیایی اشباع شده بر اثر حرارت از چوب خارج نشود. برای غلبه بر این مسئله از تیمار با بخار اشباع استفاده شد. در این شرایط از آنجا که محیط از بخار اشباع شده است، مواد اشباع شده داخل چوب تمایل کمتری به تبخیر و خروج از چوب دارند.

اغلب اتوکلاوهای آزمایشگاهی موجود در بازار به صورت پیش فرض بر روی دمای ۱۲۱ °C تنظیم شده‌اند و قابلیت بالا بردن دما را ندارند. علت آن نیز افزایش فشار شدید داخل مخزن به هنگام تولید بخار اشباع است. طبق جداول ترمودینامیک [۱۷] فشار بخار اشباع در دمای ۱۲۱ در حدود ۲ بار بوده و ساختار اتوکلاوهای موجود نیز برای تحمل این فشار طراحی شده است. اما با بالا رفتن دما، فشار بخار اشباع در دمای ۱۵۰ °C به ۴/۸ بار و در دمای ۱۸۰ °C به ۱۰ بار میرسد که ساخت اتوکلاوی با خواص ویژه را اجتناب ناپذیر کرد. برای ساخت بدنه این اتوکلاو از یک لوله بدون درز (مانیسمان) فولادی استفاده

<sup>9</sup> Dacromet



شکل ۲- شکل شماتیک شکل گیری چوب در قالب

ساعته، استحکام و پیوستگی پایینی داشت و ترک‌های زیادی در محیط محصول شکل گرفته بود به گونه‌ای اغلب به شکل کامل از داخل قالب خارج نشده و دچار شکست می‌شد (شکل ۳). از این‌رو، از نمونه‌های چوبی اشباع شده طی دوره ۷۲ ساعته، برای تکرار ساخت محصول نهایی و بررسی ویژگی‌های آن استفاده شد.

همانطور که در جدول ۱ آمده است نمونه‌های تیمار شیمیایی شده بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت، انعطاف پذیری کافی برای قالب‌گیری فشاری را نداشته و در واقع قدرت پرس برای قالب‌گیری آنها کافی نبود. چوب‌های تیمار شده به مدت ۷۲ و ۹۶ ساعت قابلیت شکل‌گیری خوبی داشتند اما محصول نهایی تولید شده پس از اشباع ۹۶

جدول ۱- اثر مدت زمان تیمار شیمیایی بر قابلیت شکل‌پذیری و پیوستگی ظاهری نمونه نهایی

پیوستگی ظاهری	قابلیت شکل‌گیری	مدت زمان اشباع (ساعت)
-	غیر قابل شکل‌گیری	۲۴
-	غیر قابل شکل‌گیری	۴۸
زیاد	مناسب	۷۲
کم	مناسب	۹۶



شکل ۳- محصول قالب‌گیری شده با نمونه‌های اشباع شده با پراکسید هیدروژن بعد از ۹۶ ساعت (ترک‌های گسترده و عدم یکپارچگی محصول نهایی)

### آزمون‌های فیزیکی روی محصول نهایی

همان‌طور که گفته شد از نمونه‌های اشباع شده طی دوره ۷۲ ساعته با پراکسید هیدروژن، برای ساخت ۴ نمونه از محصول نهایی استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان جذب آب و واکنشیدگی ابعاد بر روی ظروف ساخته شده از انتهای دایره‌ای شکل هر ظرف استفاده شد تا اندازه‌گیری‌های مربوط به ابعاد نمونه آسان‌تر باشد (شکل ۴).

**دانسیتته:** برای اندازه‌گیری دانسیته نمونه شکل داده شده، ابتدا نمونه دایره‌ای شکل به دست آمده از کف محصول داخل آون با دمای  $103^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد تا به وزن ثابت برسد. سپس قطر و ضخامت آن اندازه‌گیری شده و دانسیته از تقسیم وزن خشک بر حجم خشک به

دست آمد. دانسیته نمونه شاهد نیز به همین ترتیب پس از خشک کردن و اندازه‌گیری وزن و حجم محاسبه شد. برای اندازه‌گیری جذب آب و میزان واکنشیدگی ابعاد، نمونه‌های دایره‌ای شکل به دست آمده از انتهای ظروف و همچنین نمونه‌های شاهد به مدت شش روز داخل آب غوطه‌ور شده و در بازه‌های ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰ و ۱۴۴ ساعت ابعاد و وزن آنها اندازه‌گیری شد. پس از آخرین مرحله غوطه‌وری نمونه‌ها داخل آون  $103^{\circ}\text{C}$  خشک شده و مجدد وزن و ابعاد آنها اندازه‌گیری شد. در مورد نمونه شاهد میانگین واکنشیدگی شعاعی و مماسی به عنوان واکنشیدگی عرضی گزارش شد. از رابطه‌های ۲-۴ برای اندازه‌گیری درصد جذب آب (WA %) و درصد واکنشیدگی عرضی (SC%) و طولی (SL%) استفاده شد.

$$WA\% = \left( \frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$SC\% = \left( \frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$SL\% = \left( \frac{L_1 - L_2}{L_1} \right) \times 100 \quad (4)$$

$103^{\circ}\text{C}$  و  $W_1$ ،  $C_1$  و  $L_1$  به ترتیب مربوط به وزن، قطر نمونه دایره‌ای و ارتفاع آن در حالت خیس در زمان  $t$  است.

که در این روابط،  $W_1$ ،  $C_1$  و  $L_1$  به ترتیب مربوط به وزن، قطر نمونه دایره‌ای و ارتفاع آن در حالت خشک ( $103^{\circ}\text{C}$  آون)



شکل ۴ - نمونه دایره‌ای شکل تهیه شده از انتهای ظروف چوبی پس از ۶ روز غوطه‌وری در آب

### نتایج و بحث

#### بررسی چشمی

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود شکل‌گیری نمونه تا حدی کامل انجام شده است. با بررسی دقیق‌تر می‌توان متوجه شد که احتمالاً پس از اعمال نیرو و

فشرده‌گی اولیه، چوب به دو یا سه قسمت اصلی تقسیم شده و این قسمت‌ها به صورت سه بعدی در منافذ قالب حرکت کرده و سپس به هم رسیده‌اند. با وجود اینکه الیاف هر قسمت چسبندگی خود به یکدیگر را پس از شکل‌گیری نهایی حفظ کرده‌اند اما قابلیت متصل شدن به سایر

گوشه‌های تیز داخل قالب، حرکت مواد تسهیل شده و از تعداد ترک‌ها کاسته شد. همچنین به نظر می‌رسد اگر طراحی قالب به گونه‌ای باشد که مواد اضافه راهی برای فرار از داخل آن نداشته باشند این امر باعث فشردگی بیشتر محصول نهایی و طبیعتاً افزایش استحکام آن می‌شود.

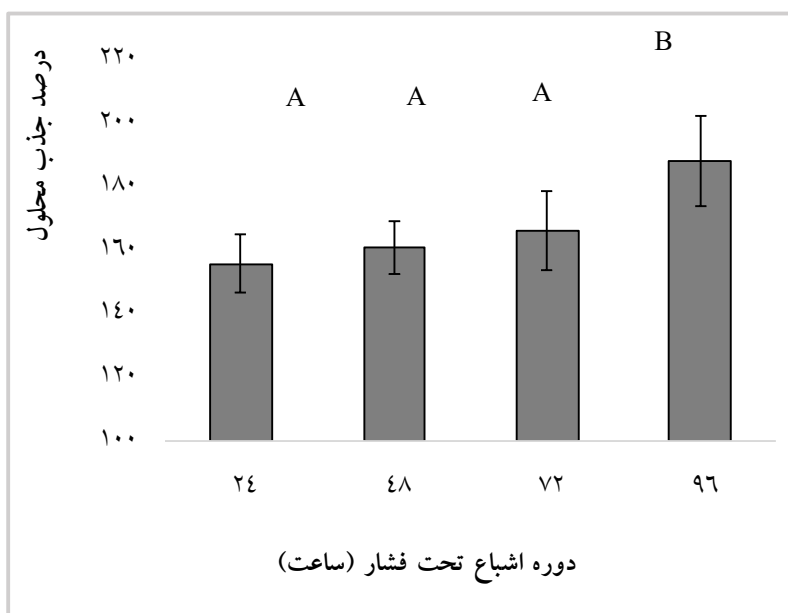
قسمت‌ها را نداشته و همین امر باعث ایجاد چند ترک اصلی در بدنه قطعه نهایی شده است. تغییر شکل قالب و انجام اصلاحات بر روی آن بر شکل و تعداد ترک‌ها بسیار موثر بود. نمونه‌های اولیه ساخته شده دارای ترک‌های زیادی بودند و ظرف ساخته شده یکپارچگی مناسبی نداشت. اما در نهایت با ایجاد گوشه‌های گرد به جای



شکل ۵ - نمونه شکل گرفته به روش قالب گیری فشاری بعد از ۷۲ ساعت اشباع با محلول آب اکسیژنه

ساعت تفاوت معنی‌داری (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) نداشت. به نظر می‌رسد بیشتر از میزان جذب پراکسید هیدروژن، زمان در معرض قرارگیری اثرگذار بوده است. از طرفی به نظر می‌رسد که بعد از ۹۶ ساعت تیمار با پراکسید هیدروژن نیز لیگنین تا حد زیادی از چوب خارج شده و محصول نهایی یکپارچگی لازم برای خروج از قالب را نداشت.

مقادیر جذب محلول پراکسید هیدروژن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر جذب محلول در ۷۲ ساعت اول تغییرات چندانی نداشته و از ۱۵۵ درصد به ۱۶۸ درصد رسید. اما بعد از ۹۶ ساعت، مقدار جذب آن به ۱۸۷ درصد رسید. همانطور که در قسمت مواد و روش‌ها گفته شد نمونه‌های اشباع شده بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت اشباع، قابلیت شکل‌گیری نداشته و از روند مطالعه کنار گذاشته شد. این در حالی‌که بود که مقدار جذب آنها با تیمار ۷۲

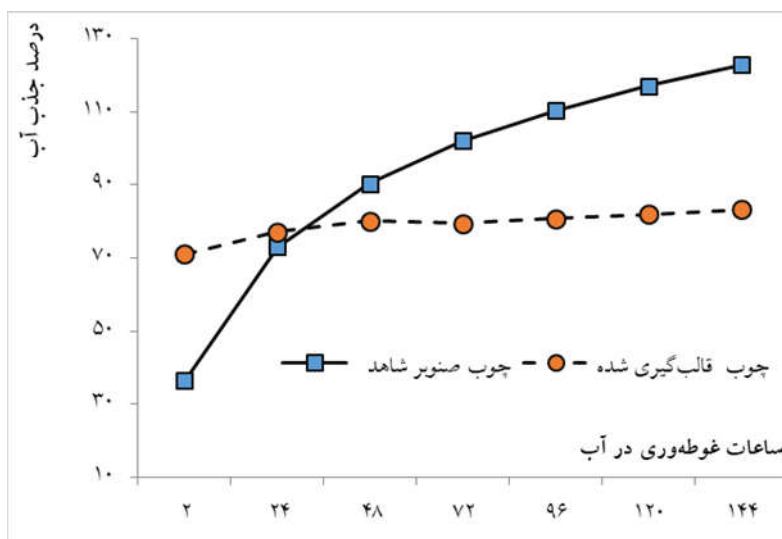


شکل ۶ - مقادیر جذب محلول آب اکسیژنه بعد از دوره‌های مختلف اشباع تحت فشار (حروف لاتین نشان‌دهنده نتایج آزمون گروه‌بندی دانکن است)

شکل داده شده در مقایسه با نمونه شاهد در شکل ۷ نشان داده شده است. جذب آب در نمونه‌های شکل داده شده طی دو ساعت بسیار سریع بود اما پس از آن کاهش یافته و طی ۱۴۴ ساعت بعدی تغییر چندانی نداشت. حداکثر میزان جذب آب پس از ۶ روز غوطه‌وری در آب نسبت به نمونه شاهد ۳۲ درصد کمتر بود.

#### آزمون‌های فیزیکی

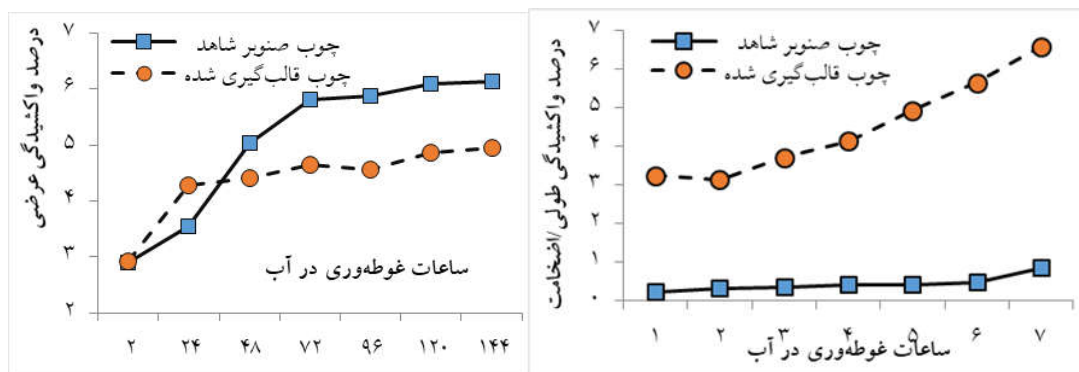
مقدار دانسیته خشک برای نمونه شاهد  $0.4 \text{ g.cm}^{-1}$  بود که در نمونه شکل داده شده به  $0.1 \text{ g.cm}^{-1}$   $\pm 0.57$  افزایش یافت که این تغییر نشان‌دهنده فشردگی محصول در حین شکل‌گیری بود. نکته قابل توجه در مورد دانسیته محصول نهایی انحراف معیار بسیار کمتر آن نسبت به نمونه شاهد بود. میزان جذب آب نمونه‌های



شکل ۷ - مقادیر جذب آب چوب صنوبر شاهد و نمونه‌های قالب‌گیری شده بعد از غوطه‌وری بلندمدت

روند تغییرات همکشیدگی عرضی نمونه‌های بدست آمده از ظروف قالب‌گیری شده روند متفاوتی داشت. نمونه‌های قالب‌گیری شده در ۲۴ ساعت اول غوطه‌وری در آب تغییرات شدیدتری داشتند. حداکثر مقدار همکشیدگی عرضی نمونه‌های قالب‌گیری شده ۱۹/۳ درصد کمتر از چوب شاهد صنوبر بود. از طرفی تفاوت همکشیدگی عرضی و ضخامت در نمونه‌های قالب‌گیری شده بسیار کمتر از نمونه شاهد بود. این موضوع نشانه دهنده آن است که در حین فرایند شکل‌گیری، الیاف چوب دیگر در یک راستا قرار نگرفته و چوب از یک ماده ارتوتروپ به صورت یک ماده تقریباً ایزوتروپ در آمده است.

میزان واکشیدگی نمونه‌ها پس از ۱۴۴ ساعت غوطه‌وری در آب در جهت عرضی و ضخامت در شکل ۸ نمایش داده شده است. در نمونه شاهد میزان واکشیدگی طولی همان‌گونه که انتظار می‌رفت بسیار کمتر از واکشیدگی در راستای عرضی بود، اما در نمونه شکل داده شده، واکشیدگی در جهت ضخامت نمونه بیشتر از واکشیدگی طولی در نمونه شاهد بود. در حقیقت هنگام شکل‌گیری چوب داخل قالب، الیاف در جهت‌های مختلف سازمان‌دهی شده و در نتیجه مقداری از واکشیدگی عرضی چوب در جهت ضخامت نمایان می‌شود. میانگین همکشیدگی عرضی نمونه‌های شاهد صنوبر تا ۷۲ ساعت اول غوطه‌وری در آب افزایش یافته و پس از آن تغییرات کمی داشت.

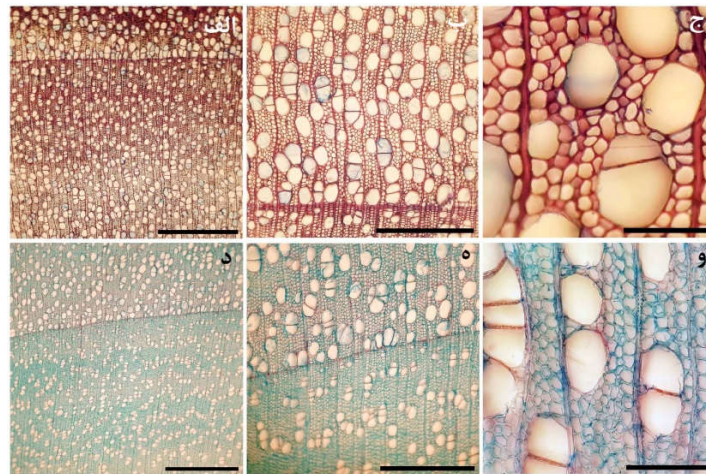


شکل ۸ - مقادیر واکشیدگی عرضی (سمت راست) و طولی/ارتفاع (سمت چپ) صنوبر شاهد و نمونه‌های قالب‌گیری شده بعد از غوطه‌وری بلندمدت در آب

(شکل ۹-د، ه، و) که حاکی از خروج لیگنین از آن‌هاست. رنگ قرمز تنها در دیواره بین‌سلولی برخی آوندها و آخرین ردیف فیبرهای چوب پایان دیده شد. شدت لیگنینی شدن دیواره آوندها و فیبرهای چوب پایان بیشتر است [۱۸] و به همین دلیل هنوز این سلول‌ها به‌طور کامل لیگنین‌زدایی نشدند. علیرغم لیگنین‌زدایی شدید چوب تیمار شده، پارگی و گسیختگی دیواره در آن دیده نشد.

### بررسی میکروسکوپی

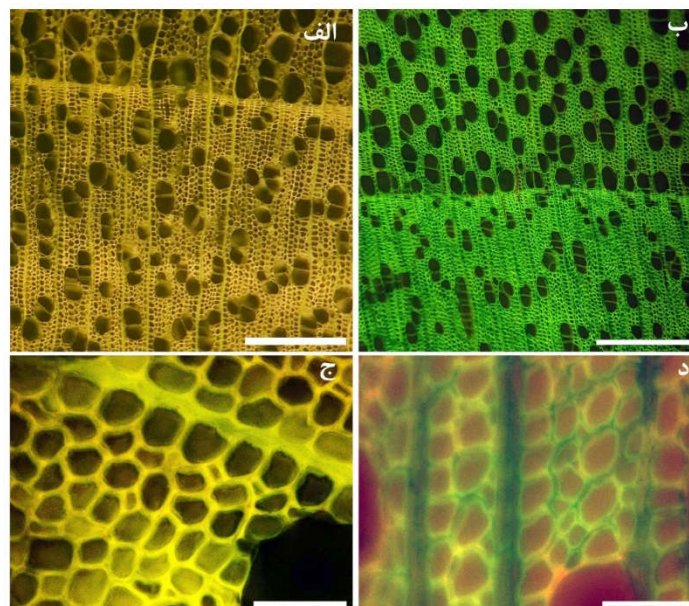
پس از رنگ آمیزی با سافرانین-آسترابلو، دیواره‌های سلولی چوب صنوبر شامل آوندها، فیبرها و پارانشیم‌ها به رنگ قرمز درآمدند (شکل ۹-الف، ب، ج) که نشان از لیگنینی بودن کامل این دیواره‌ها دارد. در داخل تعدادی از آوندها، تیل دیده شد. برخلاف چوب شاهد، دیواره سلولی بیشتر سلول‌های چوب تیمار شده، آبی‌رنگ شدند



شکل ۹ - مقطع عرضی میکروسکوپی چوب شاهد (الف - ج) و لیگنین زدایی شده (د - و) صنوبر پس از رنگ آمیزی با سافرانین - آسترابلو. خطوط مقیاس در عکس‌های الف، د = ۱ میلی متر؛ ب، ه = ۵۰۰ میکرون؛ ج، و = ۱۰۰ میکرون.

(شکل ۱۰). نمونه‌های شاهد به رنگ نارنجی دیده شدند که شدت رنگ در چوب آغاز کمتر و در ردیف‌های انتهایی چوب پایان بیشتر بود (شکل ۱۰-الف، ج) در حالیکه نمونه‌های تیمار شده، مخلوطی از رنگ سبز و نارنجی با غلبه رنگ نخست درآمدند (شکل ۱۰-ب، د). رنگ سبز را می‌توان به بافت‌های بدون لیگنین و رنگ نارنجی که بیشتر در دیواره آوندها و آخرین ردیف فیبرهای چوب پایان دیده می‌شد را به دیواره‌های لیگنینی نسبت داد.

در زیر نور برانگیزاننده ماورابنفش، بافت چوبی صنوبر شاهد به رنگ زرد پررنگ دیده شد در حالیکه شدت نور سانس شده از نمونه‌های لیگنین زدایی شده بسیار کم بوده و تقریباً کاملاً تیره دیده شدند. کاهش شدید شدت نور در نمونه‌های تیمار شده را می‌توان به کاهش میزان لیگنین آن‌ها مربوط دانست [۱۶]، [۱۹]. از این رو، نمونه‌ها با نوربرانگیزاننده آبی مورد بررسی قرار گرفتند. در زیر این نور، رنگ نمونه‌های شاهد و تیمار شده کاملاً متفاوت بود



شکل ۱۰ - مقطع عرضی میکروسکوپی چوب شاهد (الف، ج) و لیگنین زدایی شده (ب، د) صنوبر زیر میکروسکوپ فلوئورسنس با نور برانگیزاننده آبی. خطوط مقیاس در عکس‌های الف، ب = ۵۰۰ میکرون؛ ج، د = ۴۰ میکرون.

جدول ۲- معرفی پیک های IR در طول موج های مختلف [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]

ردیف	پیک مشاهده شده	در منابع	ساختار شیمیایی
۱	۳۳۱۸-۳۳۰۸	۳۳۳۰	ارتعاش گروه‌های OH (پلیمرهای سلولز، همی سلولز و لیگنین)
۲	۲۸۹۸	۲۸۸۸	ارتعاش پیوند C-H (پلیمرهای سلولز، همی سلولز و لیگنین)
۳	۲۱۶۸	-	-
۴	۲۰۳۲	-	-
۵	۱۷۳۰	۱۷۳۰	ارتعاش C=O در گروه‌های غیر مزدوج کتنی، استیل و کربوکسیل همی سلولز
۶	۱۵۹۴	۱۵۹۸-۱۵۹۰	ارتعاش C=C حلقه‌های آروماتیک لیگنین
۷	۱۴۸۶	۱۴۵۵	ارتعاش پیوند C-H از گروه‌های متوکسیل CH <sub>2</sub> و CH <sub>3</sub> لیگنین
۸	۱۳۹۰	۱۳۷۰	ارتعاش و خمیدگی پیوند C-H (پلیمرهای سلولز همی سلولز)
۹	۱۲۹۷-۱۲۹۲	۱۳۱۷	ارتعاش متحرک سلولز و همی سلولز، ارتعاش CO واحدهای لیگنین مانند سیرنجیل و گوایاسیل
۱۰	۱۲۲۴	۱۲۳۴	ارتعاش CO لیگنین و زایلان همی سلولز
۱۱	۱۱۸۶	۱۱۵۹	ارتعاش نامتقارن COC سلولز و همی سلولز
۱۲	۱۰۳۰	۱۰۲۶-۱۰۳۳	ارتعاش C-O و C-O-C همی سلولز و سلولز

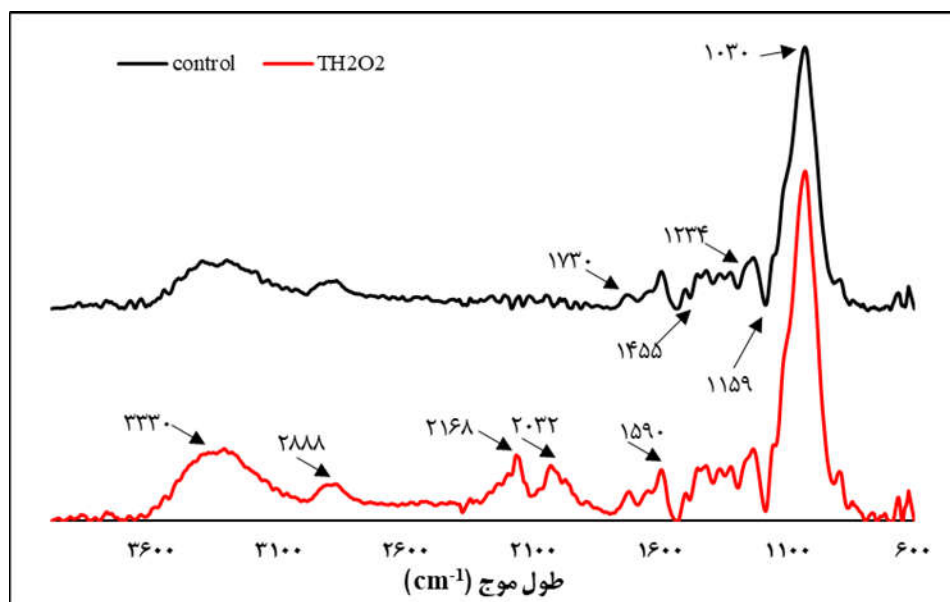
### طیف‌سنجی FTIR

پیک‌های مشاهده شده برای چوب‌های شاهد و تیمار شده با آب اکسیژنه و مقایسه آن با مقادیر گزارش شده در منابع، در جدول ۲ خلاصه شده است.

طیف‌های FTIR برای چوب شاهد و چوب تیمار شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. پیک  $3330 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده ارتعاش کششی گروه‌های OH و پیک  $2888 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش پیوند C-H است [۲۰]. شدت این پیک‌ها در نمونه تیمار شده بیشتر از چوب شاهد بود. این پیک‌ها در این مطالعه در محدوده  $3308 - 3318 \text{ cm}^{-1}$  و  $2898$  ظاهر شدند. در نمونه تیمار شده دو پیک جدید در محدوده  $2168 \text{ cm}^{-1}$  و  $2032$  ظاهر شد، که شاید بتوان آن را به پروکسید هیدروژن نسبت داد.

ارتعاش کششی C=O از گروه‌های استیل، کربوکسیل و کتونی همی سلولز به پیک  $1730 \text{ cm}^{-1}$  نسبت داده شده است. شدت این پیک در نمونه تیمار شده بیشتر از چوب شاهد بود [۲۳]. پیک  $1590 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی پیوند C=C در حلقه‌های آروماتیک لیگنین است که در آن تفاوت چندانی بین چوب شاهد و تیمار شده مشاهده نشد. این امر شاید به دلیل مقاومت حلقه‌های آروماتیک لیگنین به پروکسید هیدروژن باشد [۲۴]. پیک

$1455 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش پیوندهای گروه متوکسیل لیگنین است. شدت این پیک در نمونه تیمار شده کاهش یافت. پیک  $1370 \text{ cm}^{-1}$  و  $1317$  به ترتیب نشان‌دهنده ارتعاش پیوندهای C-H سلولز و همی سلولز و C-O واحدهای لیگنین است. پیک  $1370 \text{ cm}^{-1}$  در نمونه تیمار شده بیشتر و پیک  $1317$  تفاوت چندانی با چوب شاهد نداشت. پیک  $1370 \text{ cm}^{-1}$  در این مطالعه به طول موج‌های  $\text{cm}^{-1}$   $1390$  جابجا شده بود. پیک  $1234 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده ارتعاش پیوند C-O گروه‌های استیل زایلان همی سلولز و حلقه‌های سیرینجیل لیگنین است [۲۵]. در این پیک تفاوت قابل توجهی بین چوب شاهد و تیمار شده مشاهده نشد. پیک  $1159 \text{ cm}^{-1}$  به پیوندهای نامتقارن همی سلولز و سلولز نسبت داده شده است. شدت این پیک برای چوب تیمار شده به‌طور قابل توجهی بیشتر از چوب شاهد بود. پیک  $1030 \text{ cm}^{-1}$  به پیوندهای C-O و C-O-C همی سلولز و سلولز نسبت داده شده است. این پیک برای چوب تیمار شده شدت بیشتری نسبت به چوب شاهد داشت. افزایش قابل توجه شدت پیک‌های  $1030 \text{ cm}^{-1}$  و  $1158$  در نمونه تیمار شده نشان‌دهنده افزایش مقدار سلولز و همی سلولز در آن نسبت به چوب شاهد است [۲۶].

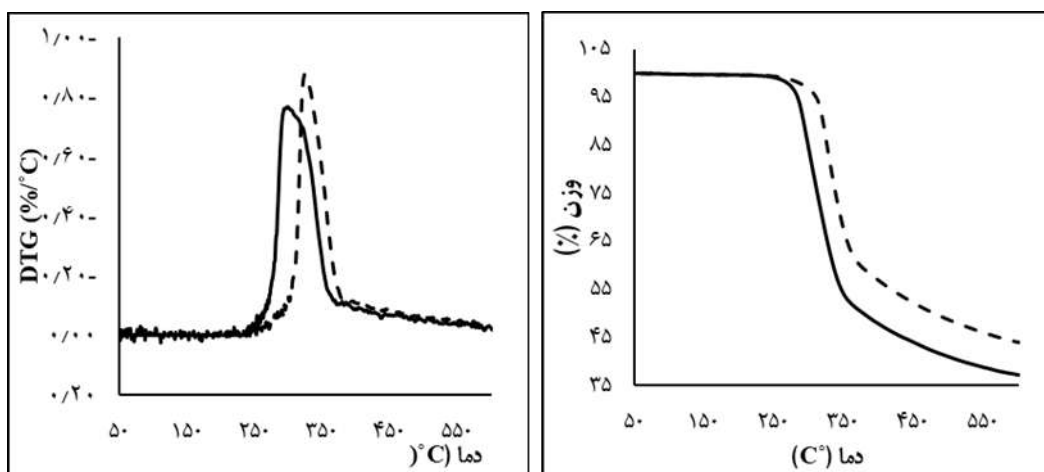


شکل ۱۱- نتایج طیف‌سنجی FTIR چوب شاهد و تیمار شده با آب اکسیژنه

### آنالیز گرماسنجی حرارتی

رفتار حرارتی چوب شاهد و چوب تیمار شده با استفاده از آنالیز گرماسنجی حرارتی (TGA) در شکل ۱۲ مقایسه شده است. تغییرات وزن نمونه بر اثر حرارت‌دهی برای هر دو نمونه در سه فاز اتفاق افتاد. در فاز اول تا دمای تقریبی  $250^{\circ}\text{C}$  نمونه‌ها ثبات زیادی در مقابل افزایش دما نشان دادند. در این بازه دمایی اغلب مواد فرار و رطوبت چوب خارج می‌شود و در حالیکه تخریب اولیه بسپارهای دیواره سلولی شروع شده است اما با کاهش وزن قابل توجه‌ای همراه نیست [۲۷]، [۲۸]. پس از آن نمونه شاهد تیمار نشده بعد از دمای  $250^{\circ}\text{C}$  کاهش وزن زیادی داشت، این در حالی بود که نمونه تیمار شده با پراکسید هیدروژن در دمای  $270^{\circ}\text{C}$  شروع به کاهش وزن کرد. این

مرحله بیشتر مربوط به تخریب پلی‌ساکاریدهای چوب است که تا دمای  $350^{\circ}\text{C}$  برای چوب شاهد و تا دمای  $390^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد برای چوب تیمار شده ادامه داشت [۲۹]، [۳۰]. در فاز بعدی شدت کاهش وزن شیب کمتری یافته و نمونه شاهد زودتر وارد فاز بعدی شد. در این مرحله کاهش وزن نمونه‌ها به تدریج تا دمای  $550^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد افزایش یافت که اغلب به تخریب لیگنین ارتباط داده شده است [۳۰]. مقدار مواد باقی‌مانده برای چوب شاهد حدود  $37/35$  درصد بدست آمد؛ در حالیکه این مقدار برای نمونه تیمار شده حدود  $44/10$  درصد بود. شدیدترین میزان کاهش وزن نمونه‌ها طبق نمودار DTG به ترتیب در دمای حدود  $298^{\circ}\text{C}$  و  $324^{\circ}\text{C}$  برای چوب شاهد و تیمار شده دیده شد.



شکل ۱۲ - نمودار وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و مشتق آن (DTG) برای چوب شاهد (خط مشکی) و تیمار شده با پراکسید هیدروژن (خط چین)

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تیمار شیمیایی چوب با پراکسید هیدروژن و تیمار بخارگرمایی امکان نرم کردن بافت چوب و شکل‌گیری آن داخل قالب را مهیا می‌سازد. طبق نتایج این تحقیق می‌توان از ضایعات چوبی کارخانه‌های چوب‌بری و مبلمان که به علت کوچکی امکان استفاده ندارند، برای تولید انبوه محصولات چوبی بدون نیاز به خرد کردن آنها استفاده کرد. محصول به دست

آمده با روش قالب‌گیری فشاری دارای دانسیته بالاتری نسبت به چوب اولیه بود. برای تولید محصولی با قابلیت تجاری‌سازی نیاز به پسا تیمارهای دیگر برای حذف ترک‌های موجود در محصول اجتناب‌ناپذیر است که خود می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد. استفاده از پلیمرهای طبیعی مانند اسید پلی‌لاکتیک و یا لیگنین و تانن می‌تواند بر روی یکپارچی بیشتر محصول کمک کند.

### منابع

- characteristics of beech wood. *BioResources*, 9(3), pp.4808-4820.
- [8] de Peres, M.L., de Ávila Delucis, R., Gatto, D.A. and Beltrame, R., 2016. Mechanical behavior of wood species softened by microwave heating prior to bending. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, pp.143-149.
- [9] Suleman, Y.H., 2015. Softening and bending of black poplar (*Populus nigra* L.) wood with chemicals. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 15(4), pp. 15-20.
- [10] Zhang, D., Zhang, A. and Xue, L., 2015. A review of preparation of binder less fiberboards and its self-bonding mechanism. *Wood Science and Technology*, 49, pp.661-679.
- [11] BARISKA, M. and SCHUERCH, C. 1977. Wood Softening and Forming with Ammonia. *Wood Technology: Chemical Aspects*, 21, 326-347pp.
- [12] Zhao, C., Qiao, X., Shao, Q., Hassan, M., Ma, Z. and Yao, L., 2020. Synergistic effect of hydrogen peroxide and ammonia on lignin. *Industrial Crops and Products*, 146, p.112177.
- [1] Kamal, M. R., Isayev, A. I. and Liu, S. J. 2009. *Injection Molding. Technology and Fundamentals*. Munich Germany, 950 Pages.
- [2] Reinprecht, L. 2016. *Wood deterioration, protection, and maintenance*. London: Wiley Blackwell. 384 Pages.
- [3] Fengel, D. and Wegener, G. 2011. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Walter de Gruyter, Berlin and New York. 618 Pages.
- [4] Li, W., Sun, N., Stoner, B., Jiang, X., Lu, X. and Rogers, R. D. 2011. Rapid dissolution of lignocellulosic biomass in ionic liquids using temperatures above the glass transition of lignin. *Green Chemistry*, 13 (8), pp. 2038–2047.
- [5] Blechschmidt, J., Engert, P. & Stephan, M. 1986. The glass transition of wood from the viewpoint of mechanical pulping. *Wood Sci. Technol.* 20, 263–272.
- [6] Ibach, R. 2021. Specialty treatments. Chapter 19 in *FPL-GTR-282*, 19-1.
- [7] Gašparík, M. and Barčík, Š., 2014. Effect of plasticizing by microwave heating on bending

- [23] Xiong, X.Q., Bao, Y.L., Liu, H., Zhu, Q., Lu, R. and Miyakoshi, T., 2019. Study on mechanical and electrical properties of cellulose nanofibrils/graphene-modified natural rubber. *Materials Chemistry and Physics*, 223, pp.535-541.
- [24] Wójciak, A., Kasprzyk, H., Sikorska, E., Khmelinskii, I., Krawczyk, A., Oliveira, A.S., Ferreira, L.F. and Sikorski, M., 2010. Changes in chromophoric composition of high-yield mechanical pulps due to hydrogen peroxide bleaching under acidic and alkaline conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 215(2-3), pp.157-163.
- [25] Moosavi Nejad, S.M., Madhoushi, M., Rasouli, D. and Vakili, M., 2017. Nondestructive evaluation of wood chemical compounds used in Gorgan historical building via FT-IR spectroscopy. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 23 (1), pp.313-328.
- [26] Popović, J., Svrzić, S., Gajić, M., Maletić, S., Dodevski, V., Djiporović-Momčilović, M., Krstić, S. and Popović, M., 2022. Light transmittance of mahogany wood treated with 20% hydrogen peroxide solution. *BioResources*, 17(4), p.5919.
- [27] Sebio-Punal, T., Naya, S., López-Beceiro, J., Tarrío-Saavedra, J. and Artiaga, R., 2012. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), pp.1163-1167.
- [28] Slopiecka, K., Bartocci, P. and Fantozzi, F., 2012. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy*, 97, pp.491-497.
- [29] Baysal, E., Deveci, I., Turkoglu, T. and Toker, H., 2017. Thermal analysis of oriental beech sawdust treated with some commercial wood preservatives. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), pp.329-338.
- [30] Nurazzi, N., Asyraf, M.R.M., Rayung, M., Norraahim, M.N.F., Shazleen, S.S., Rani, M.S.A., Shafi, A.R., Aisyah, H.A., Radzi, M.H.M., Sabaruddin, F.A. and Ilyas, R.A., 2021. Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers*, 13(16), p.2710.
- [13] Lucas, M., Hanson, S.K., Wagner, G.L., Kimball, D.B. and Rector, K.D., 2012. Evidence for room temperature delignification of wood using hydrogen peroxide and manganese acetate as a catalyst. *Bioresource technology*, 119, pp.174-180.
- [14] Sandberg, D., Haller, P. and Navi, P., 2013. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), pp.64-88.
- [15] Navi, P. and Heger, F., 2004. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. *MRS bulletin*, 29(5), pp.332-336.
- [16] Bari, E., Karim, M., Oladi, R., Tajick Ghanbary, M.A., Ghodskhah Daryaei, M., Schmidt, O., Benz, J.P. and Emaminasab, M., 2017. A comparison between decay patterns of the white-rot fungus *Pleurotus ostreatus* in chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia*) shows predominantly simultaneous attack both in vivo and in vitro. *Forest Pathology*, 47(4), p.e12338.
- [17] Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. and Swihart, M.T., 2018. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. Singapore: McGraw-Hill.
- [18] Oladi, R., Pourtahmasi, K., Eckstein, D. and Brauning, A., 2010. Study of xylem lignification in oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) along an altitudinal gradient. *Iranian Journal of Natural Resources*, 63(3), pp.215-227.
- [19] Peters, F.B. and Rapp, A.O., 2022. Wavelength-dependent photodegradation of wood and its effects on fluorescence. *Holzforschung*, 76(1), pp.60-67.
- [20] Zhuang, J., Li, M., Pu, Y., Ragauskas, A.J. and Yoo, C.G., 2020. Observation of potential contaminants in processed biomass using fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Sciences*, 10(12), p.4345.
- [21] Gupta, B.S., Jelle, B.P. and Gao, T., 2015. Wood facade materials ageing analysis by FTIR spectroscopy. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 168(5), pp.219-231.
- [22] Ganne-Chédeville, C., Jääskeläinen, A.S., Froidevaux, J., Hughes, M. and Navi, P., 2012. Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVRR spectroscopy.