DOI: 10.22092/irn.2022.127154

دیدگاه

آلاینده‌های چوب و فراورده‌های آن

رضا جزایری*[1]، رضا حاجی‌حسنی[2] و صدیقه نظری[3]

مقدمه

با توسعه صنعتی کشورهای پیشرو از قرن نوزدهم، بهره‌برداری از چوب رو به گسترش گذارد که یکی از آثار آن، کاهش سطح جنگل‌ها در اروپا بود. برای کاهش بهره‌برداری و به همراه آن پاسخگویی صنعت چوب به نیازهای رو به رشد، به‌تدریج روش‌های صنعتی اصلاح چوب توسعه یافت. تا نیمه دوم قرن بیستم، باور عمومی بر این بود که استفاده از مواد سمی روش مناسبی برای مقابله با عوامل مخرب بیولوژیک است، بی‌آنکه به پیامدهای محیط‌زیستی آن توجه شود. از چند دهه گذشته، به‌تدریج عواقب زیان‌بار استفاده از چنین روشی در آلودگی خاک، آب و هوا به‌صورت فزاینده‌ای آشکار شده که به‌طور مستقیم تهدیدکننده سلامت انسان و محیط‌زیست است. از مهم‌ترین مواد سمی مورداستفاده برای حفاظت از چوب می‌توان به کروئوزوت، پنتاکلرفنل، ترکیبات کرومات‌پایه و ارسنیک‌پایه اشاره کرد. از آغاز دهه ۹۰ میلادی استفاده از چنین موادی در صنعت چوب در کشورهای توسعه‌یافته به‌تدریج ممنوع شد.

از مهم‌ترین مواد سمی مورداستفاده برای حفاظت از چوب می‌توان به کروئوزوت، پنتاکلرفنل، ترکیبات کرومات‌پایه و ارسنیک‌پایه اشاره کرد. از آغاز دهه ۹۰ میلادی استفاده از چنین موادی در صنعت چوب در کشورهای توسعه‌یافته به‌تدریج ممنوع شد.

گسترش تولید چندسازه‌های خرده‌چوب نیز، یکی دیگر از راهکارهای عرضه محصولات چوبی طی دهه‌های گذشته به جای محصولات چوب ماسیو بوده که با بهره‌گیری از چوب‌های کم‌ارزش، از فشار بهره‌برداری از جنگل‌ها کاسته است. در این رابطه، چوب‌های کم‌ارزش‌تر و در پاره‌ای موارد، منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی به خرده‌چوب و الیاف چوبی با ابعاد مشخص تبدیل، به‌وسیله چسب به یکدیگر متصل و به تخته چندسازه چوبی تبدیل می‌شوند. ازآنجایی‌که چسب مورداستفاده فرم‌آلدهیدپایه بوده، انتشار فرم‌آلدهید از این چندسازه‌ها به‌صورت معضل دیگری محیط‌زیست و سلامتی انسان را تهدید می‌کند.

این مقاله ابتدا به موضوع آلاینده‌ها از چوب و فراورده‌های آن پرداخته، سپس، راهکارهایی را که برای برطرف‌سازی این معضل در جهان ارائه شده، تجزیه‌وتحلیل کرده است.

بحث و مرور مطالعات آلایندگی فراورده‌های چوبی

در صنعت چوب با اهداف متعددی، از مواد شیمیایی استفاده می‌شود. یکی از این اهداف، افزایش دوام چوب در برابر شرایط آب‌وهوایی، همچنین عوامل مخرب طبیعی است. بدین منظور فرایندهایی با عنوان اصلاح چوب انجام می‌شود. اصلاح سطحی چوب راهکاری است که از گذشته‌های دور انجام شده و با استفاده از مواد جدید اصلاح‌کننده ادامه داشته است. در گذشته، بیشتر از مواد طبیعی به‌صورت سطحی برای پرداخت چوب استفاده می‌شد تا هم ظاهر چوب بهتر شود و هم مقاومت آن در مقابل تغییرات رطوبتی افزایش یابد. به مرور زمان و در عصر صنعتی با مصرف روزافزون محصولات چوبی، بیشتر، مواد شیمیایی صنعتی برای پوشش‌دهی سطحی استفاده شدند که بسیاری از آنها دارای ترکیبات آلی فرار (VOC) هستند. چوب و فراورده‌های آن به دو صورت می‌توانند محیط‌زیست را آلوده کنند و سلامتی انسان را به خطر اندازند که در ادامه شرح داده می‌شود.

استفاده از مواد سمی برای اشباع چوب

طی دو قرن گذشته از روش‌های اشباع چوب برای نفوذ مواد اصلاح‌کننده به عمق چوب استفاده شد و از نیمه دوم قرن

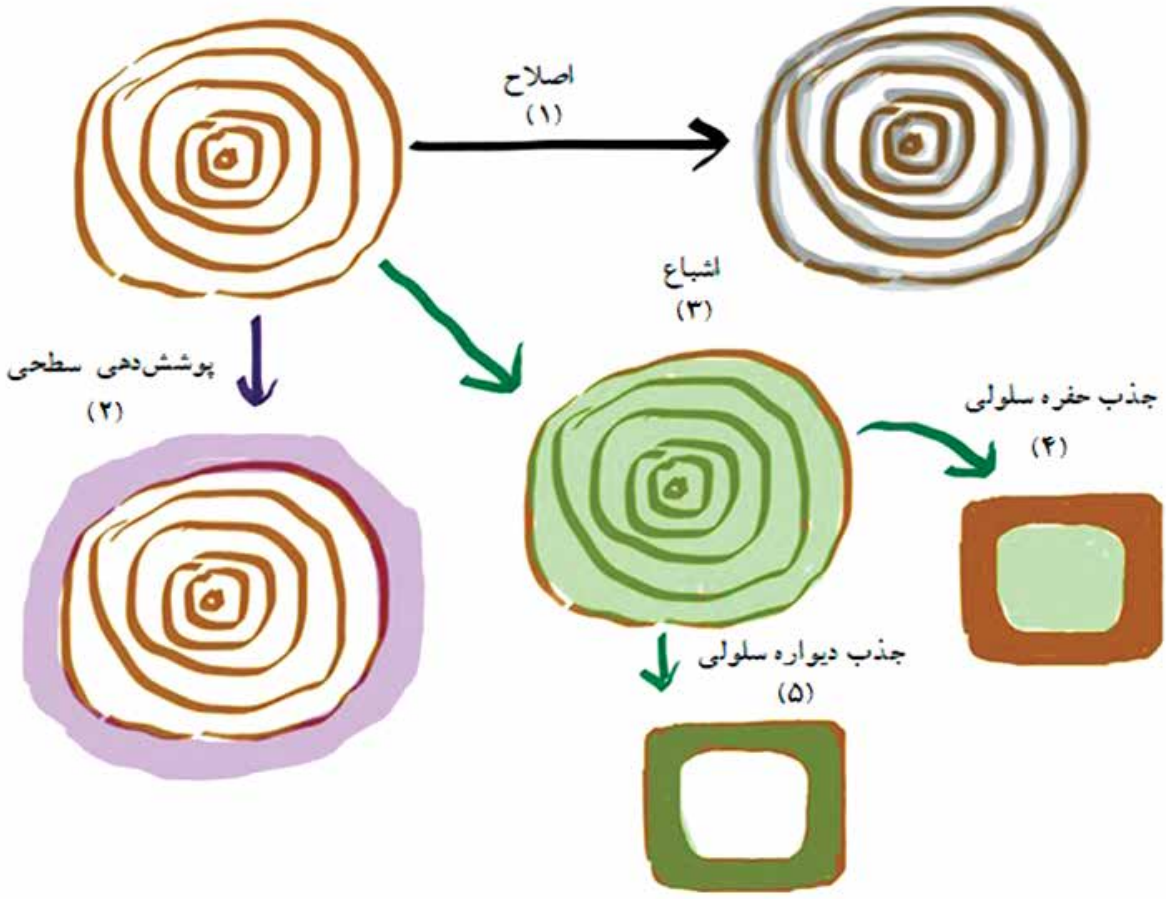
۱*- نویسنده مسئول، محقق بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
پست الکترونیک: jazayeri@rifr-ac.ir
۲- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۳- کارشناس بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

گذشته به‌تدریج آثار سوء آن بر محیط‌زیست و سلامتی انسان آشکار شد. این فراورده‌ها هم در تماس با انسان خطرزا هستند و هم می‌توانند آب و خاک را آلوده کنند. محصولاتی که به‌صورت عمقی اصلاح یا در اصطلاح اشباع می‌شوند، بیشتر در فضای باز کاربرد دارند، هرچند در محیط کاری کارخانه نیز، که فضای بسته به‌شمار می‌آید، منبع آلوده‌سازی محیط و عامل تهدید سلامتی انسان تلقی می‌شود.

در این خصوص آلوده‌سازی محیط به فرایندهایی ارتباط دارد که در آنها مواد سمی با اهداف حفاظتی در برابر عوامل بیولوژیک استفاده می‌شوند و قابلیت آن را دارند که به‌صورت محلول به محیط‌زیست وارد شوند. برای نمونه، استفاده از کروئوزوت و محلول‌های سلکور حاوی فنل یا عناصر سمی کروم و آرسنیک که چوب با آنها اشباع می‌شود و بر اثر آب‌شویی وارد منابع آب و خاک می‌شود. Hill (۲۰۰۶)، خاطرنشان می‌کند، این مواد سمی هستند و به‌سرعت دچار آب‌شویی می‌شوند که درنهایت منجر به آلودگی‌های محیط‌زیست می‌شوند، بنابراین، امروزه به‌کارگیری مواد و مکانیسم‌های غیرسمی در حال جایگزینی با آنها است. البته باید به تخریب زیستی و غیرزیستی این‌گونه محصولات در محیط‌زیست نیز اشاره کرد. در دهه‌های اخیر، توجه گسترده به مسائل زیستی سبب کاهش استفاده از ترکیبات شیمیایی شده که برای سلامتی انسان‌ها و محیط‌زیست مضر است، به‌طوری‌که مواد و روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست به‌تدریج در حال جایگزینی با آنهاست (Kocaefe *et al.*, 2007).

بنابراین، به مرور استفاده از مواد و روش‌های سازگار با طبیعت توسعه یافت و کوشش‌های پژوهشی با هدف ارتقای کمی و کیفی آن انجام شد و همچنان ادامه دارد.

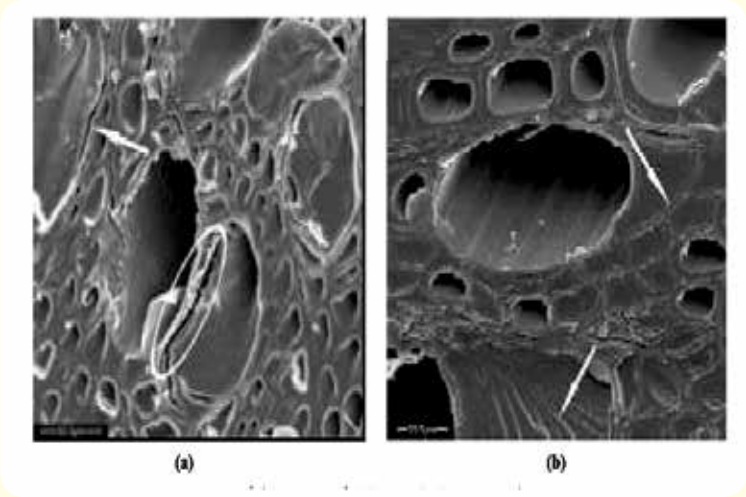
استفاده از مواد شیمیایی در اصلاح چوب سابقه طولانی دارد. شکل ۱ نشان می‌دهد، مواد به‌صورت محلول یا مونومر چگونه حفرات و دیواره سلولی چوب را در سطح و عمق اشغال می‌کنند. در بخش (۱) اصلاح دیواره سلولی بر اثر فرایند اصلاحی مشاهده می‌شود که علاوه‌بر مواد، بر اثر تیمار حرارتی نیز انجام می‌شود. بخش (۲) تأثیر پوشش‌دهنده‌های سطحی را نشان می‌دهد که به‌صورت قطع ارتباط سطح چوب با محیط عمل می‌کند. بخش (۳) فرایند اشباع چوب را نمایش می‌دهد. در رابطه با مواد پلیمری چنانچه اصلاح‌کننده شیمیایی یا مونومر مورد استفاده قطبی باشد، واکنش شیمیایی با دیواره سلولی رخ می‌دهد (بخش ۵) و در رابطه با مونومر غیرقطبی تنها حفرات سلولی پر می‌شوند (بخش ۴). اگر اشباع با مواد سمی معمول باشد واکنشی رخ نمی‌دهد و مواد بیشتر در دیواره سلولی رسوب



می‌کنند، ازاین‌رو در معرض آب‌شویی قرار دارند.
در رابطه با اشباع چوب با مواد پلیمری، لازم است اشاره شود، مونومرهای غیرقطبی تنها پرکننده تخلخل هستند، درحالی‌که مونومرهای قطبی با ورود به دیواره سلولی، باعث کوپلیمرشدن با دیواره سلولزی چوب و منجر به استحکام بیشتر فراورده حاصل می‌شوند. در شکل a۲، مقاومت به ضربه کم چوب پلیمر استایرین مشاهده می‌شود، ولی زمانی که استایرین با مونومر قطبی گلیسیدیل‌متااکریلات GMA تلفیق شده، وضعیت بهتری حاصل شده است (شکل b۲).

انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs)

شکل دوم آلایندگی، انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) از موادی است که برای تولید محصولات چوبی استفاده می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.
در خصوص فراورده‌هایی که در فضای بسته و درون ساختمان مسکونی استفاده می‌شوند، آلایندگی بیشتر یا از سطوح پرداخت‌شده چوبی منتشر می‌شود، یا درنتیجه انتشار فرم‌آلدهید از چندسازه‌های چوبی است. در محیط کاری علاوه‌براین دو، فرایند تولید نیز عامل دیگری محسوب می‌شود. به‌علاوه همان گونه که Adhikari و Ozarska (۲۰۱۸) اشاره کردند، تخریب زیستی و غیرزیستی نظیر سوزاندن، باعث انتشار ترکیبات آلی فرار در فضای باز می‌شود.
Adamová و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند، بسیاری از مواد مختلف که در ساختمان استفاده می‌شوند، از قابلیت انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) برخوردارند. ازآنجایی‌که غلظت بالای بسیاری از این ترکیبات در هوای داخل فضاهای مسکونی با آثار منفی بر سلامت انسان همراه بوده، بحث‌های مناقشه‌آمیزی در ارتباط با استفاده از مواد مربوطه به میان آمده است، زیرا به‌دلیل گازی‌بودن، بخش زیادی از آنها از راه تنفس وارد بدن انسان می‌شود. بنابراین، مدت ماندگاری چنین ترکیباتی در هوای داخلی، یک مورد نگران‌کننده به‌شمار می‌رود، اینجاست که بیماری سندرم ساختمان (SBS) موضوعیت می‌یابد. ازنظر تاریخی، چوب و پانل‌های چوب‌پایه، نشان‌دهنده یک ماده پرکاربرد در ساختمان‌های مسکونی و حاوی تعداد زیادی ترکیبات آلی فرار (VOCs) متفاوت هستند. این موضوع می‌تواند بر کیفیت هوای داخل ساختمان (محیط داخلی) چه در محل زندگی و چه در محل کار انسان تأثیر بگذارد.



شکل ۲- تصویر SEM بعد از آزمون مقاومت به ضربه. (a) اثر شکستگی مشاهده می‌شود، (b) بدون شکستگی است. (Li, 2010)

شکل ۳- ترکیبات آلی فرار (VOCs) از چوب و پانل‌های چوب‌پایه، منابع و تأثیر آنها (Adamova *et al.*, 2020)

انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) از چوب

انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) از چوب ماسیو در ارتباط با مواد استخراجی آن بوده است و بسته به گونه، کمیت و کیفیت متفاوتی دارد و در خصوص چندسازه‌های چوبی موضوع مواد شیمیایی مورداستفاده مطرح است. Adam-ová و همکاران (۲۰۲۰)، به این موضوع اشاره کردند که بخش مهمی از مواد استخراجی چوب، دربرگیرنده ترکیبات آلی فرار (VOCs) نیز هستند، این ترکیبات شامل ترپن‌ها، ترپنوئیدها، فلاونوئیدها، الکل‌ها، آلدهیدها و کتون‌ها، همچنین مقادیر کمتری از آلکن‌های بالاتر و اسیدهای چرب هستند و می‌توانند به مرور از چوب آزاد شوند. در درجه اول وجود ترپن‌ها در چوب به رزین مربوط می‌شود. در چوب درختان سوزنی‌برگ، رزین در سلول‌های پارانشیم و کانال‌های رزین جریان دارد. در سلول‌های پارانشیم از ترپن‌ها، استرها، چربی‌ها و موم‌ها و در کانال‌های رزینی اسیدهای رزینی و ترپن‌های فرار می‌توانند تشکیل شوند. کانال‌های رزینی درون چوب سوزنی‌برگان بیشترین مقادیر ترپن‌ها را در خود جای می‌دهند. مونو، دی و سسکوی‌ترپن‌ها در چوب سوزنی‌برگان و تری‌ترپن‌ها و استرول‌ها در چوب پهن‌برگان ترکیبات غالب آلی مواد استخراجی هستند. غلظت‌های VOC چوب ماسیو سوزنی‌برگان بیشتر از انتشار ترپن‌های فرار (۷۰–۹۰ درصد) و هگزانال و اسیداستیک در مقادیر کمتر (۱۰–۲۵ درصد) تشکیل شده‌اند. انتشار VOC از چوب پهن‌برگان به‌طور چشمگیری (تقریباً ۵۰ برابر) کمتر است که بیشتر شامل هگزانال و پنتانال و اسیدستیک است. به‌هرحال خطر انتشار VOC از چوب‌های معمول تجاری بسیار کمتر از مواد شیمیایی مورداستفاده است و در زمان مصرف کاهش می‌یابد.

نتایج نشان داده است که تولوئن و پینن غالب‌ترین اجزای انتشار مواد فرار آلی بودند. حلال‌های مورداستفاده برای رنگ‌ها مانند بوتیل و اتیل‌الکل، تولوئن، استون، بوتیل و اتیل‌استات، اتیل‌سلوسولو، زایلن، حلال اکسی‌ترپن، استایرن، متیل‌اتیل‌کتون و اتیل‌گلیکول‌استات مواد شیمیایی مضر برای انسان هستند. بیشترین انتشار در زمان پوشش‌دهی سطوح رخ می‌دهد و بخش کمتر در محصول نهایی با یک دوره طولانی در پوشش باقی می‌ماند و به مرور زمان از پوشش به محیط هوای اتاق منتشر می‌شود.

انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) از پوشش‌دهنده‌های چوب

Rybin و همکاران (۲۰۱۹)، به آیین‌نامه‌های فنی اشاره کردند که برای برطرف‌سازی انتشار بیش از حد غلظت مجاز مواد شیمیایی مضر در هوای داخل منزل وضع شدند تا از آسیب به سلامت انسان جلوگیری شود. حلال‌ها و رنگ‌ها، دسته دیگری از مواد شیمیایی هستند که به‌صورت غشای لاکی جامد به‌عنوان پوشش‌های محافظ و تزیینی سطح چوب در انواع محصولات و فراورده‌های چوبی استفاده می‌شوند و در طول خشک شدن، باعث انتشار ترکیبات آلی فرار (VOC) می‌شوند. نتایج نشان داده است که تولوئن و پینن غالب‌ترین اجزای انتشار مواد فرار آلی بودند. حلال‌های مورداستفاده برای رنگ‌ها مانند بوتیل و اتیل‌الکل، تولوئن، استون، بوتیل و اتیل‌استات، اتیل‌سلوسولو، زایلن، حلال اکسی‌ترپن، استایرن، متیل‌اتیل‌کتون و اتیل‌گلیکول‌استات مواد شیمیایی مضر برای انسان هستند. بیشترین انتشار در زمان پوشش‌دهی سطوح رخ می‌دهد و بخش کمتر در محصول نهایی با یک دوره طولانی در پوشش باقی می‌ماند و به مرور زمان از پوشش به محیط هوای اتاق منتشر می‌شود. در محل کار، رعایت اصول ایمنی هنگام استفاده از مواد برای تولید محصولات و تعیین مقدار مجاز برای به صفر رسیدن انتشار در زمان استفاده در محیط‌های مسکونی از الزامات فنی محسوب می‌شود.

Adhikari و Ozarska (۲۰۱۸)، به مقرراتی با قانون هوای پاک (در ایالات متحده آمریکا) اشاره کردند که به موجب آن محصولات جدید دارای مقادیر کم ترکیبات آلی فرار (VOC)خواهند بود. در همخوانی با مقررات VOC کم، بسیاری از پوشش‌ها و حلال‌ها فرمول‌بندی و محصولات جدیدی در این خصوص ارائه شده‌اند، الزامات VOC کم، باعث شده در مواردی فرمول‌های تشکیل‌دهنده فیلم به محصولاتی که به سطح چوب نفوذ می‌کنند، ترجیح داده شوند. همچنین به حلال‌ها و رنگ‌ها که حاوی مواد جامد کمتر و رقیق‌کننده‌های واکنش‌دهنده هستند، اشاره شده است، به‌طوری‌که انواع جدیدی از حلال‌ها به‌ویژه آب‌پایه برای نفوذ به عمق چوب و حلال‌های کمکی ارائه شده‌اند.

Adhikari و Ozarska (۲۰۱۸)، این موضوع را مطرح کردند که منابع عمده آثار محیط‌زیستی در سراسر زنجیره تأمین چوب از کارخانه‌های چوب‌بری تا فراوری محصولات نهایی رخ می‌دهد. در این خصوص، توجه به سلامت کارکنان کارخانه‌ها که به‌طور مستقیم در معرض آلاینده‌ها هستند، ضروری عنوان شد. در ابتدا، مرحله چوب‌بری منجر به انتشار ذرات چوب در هوا می‌شود که دستگاه تنفسی انسان را درگیر می‌کند و می‌تواند منجر به خطر ابتلا به بیماری‌هایی مانند سرطان شود. انتشار ترکیبات آلی فرار از چوب و مواد شیمیایی مورداستفاده در فرایند تولید محصول، معضل دیگری به‌شمار می‌رود. بنابراین، نتایج تحقیق ایشان نشان داد، ضمن آنکه باید اصول ایمنی رعایت شود و از وسایل کاهنده ورود آلاینده‌ها به بدن استفاده شود، لازم است ماشین‌آلات مربوطه نیز، نوسازی شوند، درواقع، فرسودگی ماشین‌آلات به همراه افزایش آلایندگی باعث کاهش بهره‌وری مواد و انرژی می‌شود، مسئله دیگری نیز با عنوان اثر کربن مطرح می‌شود، این موضوع خود به‌عنوان آلایندگی محیط‌زیست منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود که ناشی از افزایش مصرف انرژی است.

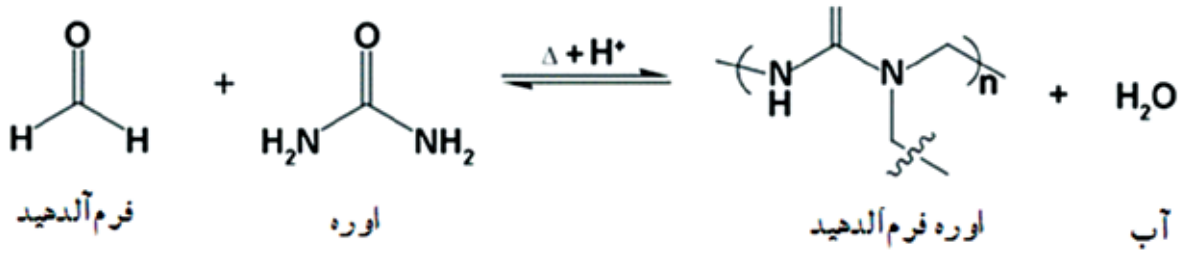
انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) از چندسازه‌های چوبی (انتشار فرم‌آلدهید)

Rybin وهمکاران (۲۰۱۹)، در خصوص چندسازه‌های چوبی نظیر تخته‌خرده‌چوب و تخته‌فیبر نیمه‌سنگین (MDF) انتشار فرم‌آلدهید را به‌عنوان چالشی اصلی مطرح کردند. آنها به آیین‌نامه‌های فنی اشاره کردند که برای برطرف‌سازی انتشار بیش از حد غلظت مجاز مواد شیمیایی مضر در هوای داخل منزل وضع شدند تا از آسیب به سلامت انسان جلوگیری شود.

میزان رزین‌های مورداستفاده برای پانل‌های چندسازه چوبی معادل ۳/۲ میلیون تن رزین جامد بوده که ۲/۶ میلیون تن آن رزین اوره فرم‌آلدهید (UF) است که به‌دلیل حساسیت به رطوبت در پانل‌هایی با کاربرد در محیط داخلی استفاده می‌شوند (Lei *et al.*, 2008). شکل ۴ واکنش تهیه چسب اوره فرم‌آلدهید را نشان می‌دهد و همان گونه که مشاهده می‌شود، اتصالات آمینومتیلنی عامل پلیمریزاسیون چسب، قابلیت هیدرولیز منتج به شکستن اتصالات و درنتیجه انتشار فرم‌آلدهید را دارد.

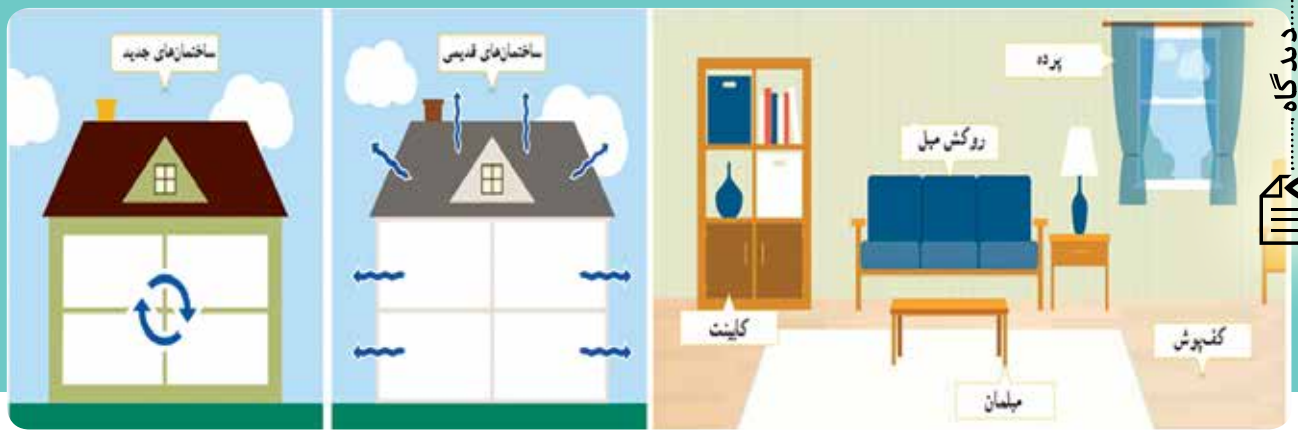
ذکر این نکته لازم است که تولید سالانه محلول فرم‌آلدهید (فرمالین) حدود ۲۵ میلیون تن در سراسر جهان است که بیش از ۶۵ درصد آن برای ساخت چسب‌های مختلف به‌ویژه چسب اوره فرم‌آلدهید استفاده می‌شود (Salthammer *et al.*, 2010). فرم‌آلدهید(CH_2O) یک ماده شیمیایی مهم و پرکاربرد صنعتی است که واکنش‌پذیری بسیار بالایی دارد. غلظت‌های بالای ppm ۰/۱ فرم‌آلدهید در هوای خانه سبب سوزش چشم، آسیب به غشای مخاطی، سردرد و احساس سوزش در نای و مشکل در تنفس می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد، چگونه ترکیبات فرار آلی مانند فرم‌آلدهید اندام‌های بدن را درگیر می‌کنند.

Hun و همکاران (۲۰۰۹)، اشاره کردند که فرم‌آلدهید خطر ابتلا به سرطان تجمعی را افزایش می‌دهد. با گذشت زمان، به‌طور فزاینده‌ای



شکل ۴- واکنش تهیه چسب اوره فرم‌آلدهید و قابلیت هیدرولیز برگشت‌پذیری اتصالات آمینومتیلن (Fihart *et al.*, 2020)

شکل ۵- درگیرشدن اندام‌های بدن توسط آلاینده‌های ترکیبات فرار آلی ازجمله فرم‌آلدهید (ASTDR, 2010)



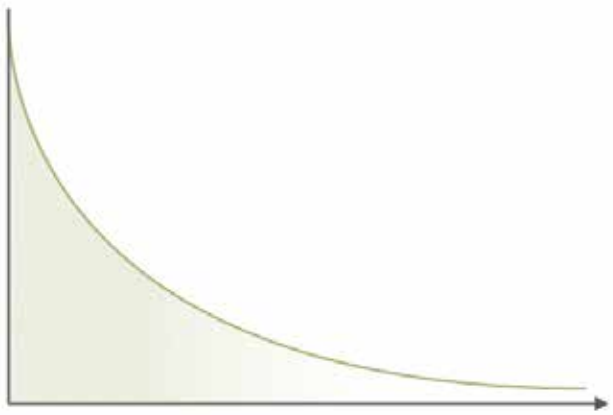
شکل ۶- مقایسه ساختمان‌های جدید و قدیم (راست)، حضور محصولات چوبی (چپ) (Persily *et al.*, 2010)

آشکار شده است خطر فرم‌آلدهید بیشتر از چیزی است که بیش‌ازاین تصور می‌شد. این موضوع منتج به روند نزولی سطح غلظت تعیین‌شده مجاز فرم‌آلدهید در هوای محیط توسط سازمان‌های مرجع شده است. درنتیجه، دولت‌های کشورهای توسعه‌یافته این مقررات را به‌طور قانونی تصویب کردند تا انتشار فرم‌آلدهید را محدود کنند. آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC, 2004) گزارش داد، شواهد کافی وجود دارد که نشان می‌دهد فرم‌آلدهید باعث سرطان نازوفارنکس در انسان می‌شود، به‌طوری‌که آن را به‌عنوان آلاینده خطرناک در رده نخست مواد سرطان‌زا گروه‌بندی کرد. علاوه‌براین قرارگرفتن در معرض فرم‌آلدهید، می‌تواند خطر آسم و آلرژی کودکان را افزایش دهد (Garrett *et al.*, 1999؛ Rumchev *et al.*, 2002). طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی، فرم‌آلدهید در ردیف یک ماده سرطان‌زای بالقوه خطرناک و یک آلاینده مهم محیط‌زیستی طبقه‌بندی شده است (Salthammer *et al.*, 2010). سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2006)، فرم‌آلدهید را که پیش‌ازاین در دسته سوم آلاینده‌های سرطان‌زا جای داشت، به ردیف اول طبقه‌بندی انتقال داده است. کنگره ایالات متحده، معیارهای قانونی را درمورد محدود کردن انتشار فرم‌آلدهید به تصویب رساند و استانداردهای نهایی را در سال ۲۰۱۳ منتشر کرد. Wolkoff & Nielsen (2010)، میزان حداکثر ppm ۰/۱ فرم‌آلدهید را در محیط به‌عنوان حد مجاز که سلامتی انسان را به خطر نیاندازد، رضایت‌بخش ارزیابی کرد. WHO (۲۰۱۰)، همین حد را به‌عنوان حد مجاز تعیین کرد. در سال ۲۰۱۶ کشور آلمان، میزان مورد بحث را مبنا قرار داد. بدین‌ترتیب مقررات سخت‌گیرانه به همراه حداکثر مقادیر مجاز برای انتشار فرم‌آلدهید توسط کشورهای صنعتی توسعه‌یافته تعریف شده است.

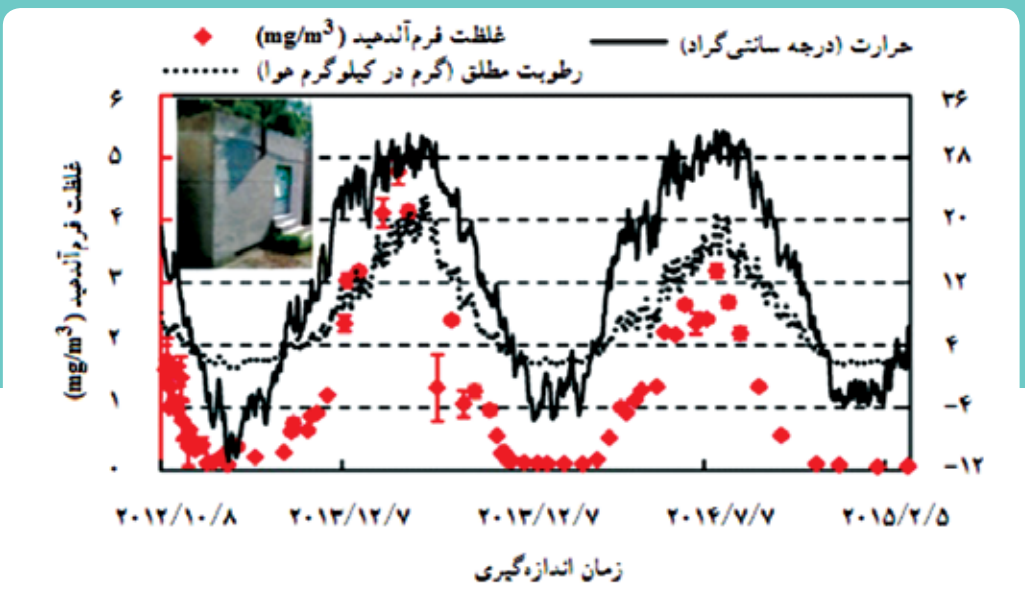
Pikrrel و همکاران (۱۹۸۶) نشان دادند، محصولات مصرفی، به‌طور خاص مصالح ساختمانی، منبع اصلی فرم‌آلدهید در محیط داخلی محسوب می‌شوند. Kelly و همکاران (۱۹۹۹)، گزارش کردند چندسازه‌های چوبی فرم‌آلدهید پایه که در فضای داخلی ساختمان استفاده می‌شوند، عامل اصلی انتشار فرم‌آلدهید در محیط بسته هستند. بنابراین، مشاهده می‌شود چندسازه‌های چوبی منبع اصلی انتشار فرم‌آلدهید در ساختمان و یکی از منابع بیماری سندرم ساختمان (SBS) هستند، چون به سبب حساسیت به رطوبت و درنتیجه قابلیت هیدرولیز رزین مورد استفاده، تنها در محیط داخلی ساختمان استفاده می‌شوند، جایی که غلظت آلاینده‌کننده‌ای نظیر فرم‌آلدهید در فاز گازی در واحد حجم می‌تواند افزایش یابد و به اندازه مخاطره‌آمیزی رسد و سلامت انسان را تهدید کند. آثار نامطلوب فرم‌آلدهید بر کیفیت هوای داخل ساختمان (IAQ) نگرانی جدی بوده و برای به حداقل رساندن انتشار آن از چندسازه‌های ساخته‌شده با رزین اوره فرم‌آلدهید مجموعه‌ای از قواعد و قوانین از سال ۱۹۸۱ تاکنون وضع شده است (Chen *et al.*, 2016). در شکل ۶، ساختمان‌های جدید که شرایط عایق‌سازی حرارت، در آنها به‌شدت لحاظ شده است مشاهده می‌شود، در آنجا غلظت ترکیبات آلی فرار نظیر فرم‌آلدهید می‌تواند به حد خطرناکی برسد.

هرچند که به‌طور طبیعی انتشار فرم‌آلدهید در زمان تولید محصول و در روزهای اول بعد از آن بسیار زیاد است، اما در درازمدت هم چندسازه‌های فرم‌آلدهیدپایه قابلیت انتشار دارند. نتایج مطالعات میدانی نشان داده است، انتشار فرمالدهید از برخی چندسازه‌های چوبی E۱ می‌تواند تا هفت سال نیز ادامه یابد، البته بسیار کمتر از ماه‌های اول بعد از ساخت است (Chuck *et al.*, 2012)، که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

یکی از مشکلات، حساسیت به رطوبت در اتصالات است. نتایج مطالعات و پژوهش‌های بسیاری از پژوهشگران دلالت بر آن دارد که در زمان



شکل ۷ – کاهش سطح انتشار فرم‌آلدهید از تخته پس از ۲ سال (Park & Ikeda, 2006)



شکل ۸- تغییرات انتشار فرم‌آلدهید بسته به دما و رطوبت مطلق در طول زمان (Liang *et al*., 2015)

مصرف، رطوبت نسبی و حرارت، عوامل محیطی بوده که به‌صورت سینرژیک (هم‌افزا) به افزایش انتشار فرم‌آلدهید حتی در پانلی که در ابتدا ناچیز بوده، می‌انجامد.

Andersen و همکاران (۱۹۷۵)، مشاهده کردند، نرخ انتشار فرم‌آلدهید از تخته‌خرده‌چوب، زمانی که رطوبت نسبی از ۳۰ درصد به ۷۰ درصد افزایش می‌یابد، دو برابر می‌شود. William (۲۰۱۷)، تأثیر دما را بر انتشار فرم‌آلدهید از تخته MDF اندازه‌گیری و گزارش کرد، با افزایش دما از ۲۶ تا ۳۹ درجه سانتی‌گراد، میزان انتشار می‌تواند تا میزان ۱۹۲درصد افزایش یابد. Liang و همکاران (۲۰۱۵)، غلظت فرم‌آلدهید محیط داخلی ساختمان را، که ناشی از انتشار از تخته MDF بود، در ارتباط با حرارت و رطوبت نسبی در طول ۲۹ ماه اندازه‌گیری کردند، در ازای این مدت، حرارت از ۱۰/۹ درجه زیر صفر تا ۳۱/۴ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی از ۴۶/۵ تا ۸۳/۶ درصد و رطوبت مطلق از ۱/۱ تا ۱/۲۳ گرم در یک کیلوگرم جرم هوای خشک بسته به زمان‌های اندازه‌گیری در فصل‌های سال در نوسان بود. نتایج نشان داد، غلظت فرم‌آلدهید می‌تواند در فصل تابستان تا ۲۰ برابر اندازه مشاهده‌شده در زمستان افزایش یابد که این تغییرات تابع شرایط دمایی و رطوبتی داخل ساختمان بود. میان غلظت فرم‌آلدهید و رطوبت مطلق همبستگی مثبتی مشاهده شد. شایان ذکر اینکه اندازه‌گیری تابستان بعد از زمستان انجام شد. همچنین، گزارش شد، غلظت فرم‌آلدهید در سال بعد به میزان ۲۰ تا ۶۵ درصد بسته به ماه‌های سال کاهش یافت (شکل ۸).

تأثیر دما به‌عنوان تسریع‌کننده واکنش هیدرولیز اتصالات آمینومتیلن با مولکول‌های آب عمل می‌کند (Wiglusz *et al*, 2002) که به‌عنوان واکنش هیدرولیتیک شناخته می‌شود (Pizzi, 1989). این واکنش (تأثیر حرارت) زمانی اهمیت دارد که رطوبت چوب به بالای ۸ درصد می‌رسد و نتیجه آن گسستگی اتصال‌های عرضی در رزین است (Pizzi, 1989). فرم‌آلدهید و سلولز مواد قطبی محسوب می‌شوند که از طریق پیوند هیدروژنی، مولکول متیلول‌سلولز را تشکیل می‌دهند.

راهکارهای کاهش انتشار فرم‌آلدهید از چندسازه‌های چوبی

راهکارهای مؤثر و ممکن در کاهش انتشار فرم‌آلدهید را می‌توان در پنج بخش معرفی کرد: ۱- گزینش ماده اولیه لیگنوسلولزی مناسب، ۲- اصلاح فرمولاسیون در زمان سنتز چسب، ۳- استفاده از اصلاح‌کننده‌های رزین در هنگام مصرف و ساخت تخته‌ها نظیر انواع افزودنی‌ها، ۴- تیمار حرارتی پس از خروج تخته از پرس و ۵- اقدامات مختلف در هنگام استفاده از چندسازه‌ها مانند استفاده از انواع پوشش‌دهنده‌های سطوح و لبه‌ها.

در رابطه با ماده لیگنوسلولزی مورداستفاده، هر چه کیفیت آن بهتر باشد و منتج به تولید تخته با استحکام و ثبات ابعادی بیشتری شود، شکست اتصالات میان ذرات و الیاف چوب با رزین کمتر رخ خواهد داد و درنتیجه آزادسازی فرم‌آلدهید کاهش خواهد یافت.

در خصوص عامل بعدی ضرورت دارد، از میزان کم فرم‌آلدهید طی فرایند سنتز چسب اطمینان حاصل کرد، این امر با تمرکز روی بهبود شرایط و فرایند انعقاد چسب (Park *et al*., 2003) ، همچنین نسبت بهینه اوره به فرم‌آلدهید) که به‌تازگی به یک، کاهش داده شده است) امکان‌پذیر است (Myers *et al*., 1985 ؛ Que *et al*., 2007). کاهش نسبت مولی، یکی از روش‌های مرسوم در کاهش انتشار فرم‌آلدهید به‌شمار می‌رود که البته باید برای آن نسبت قابل‌قبولی را به دست آورد، زیرا کاهش بیش از حد آن سبب کاهش سرعت انعقاد چسب به‌دلیل مقدار کم فرم‌آلدهید آزاد می‌شود (Mayer *et al*., 1985). درواقع، فرم‌آلدهید آزاد موجود در چسب که منبع اصلی انتشار فرم‌آلدهید محسوب می‌شود، دارای توانایی واکنش با کاتالیزورها مانند آمونیوم‌کلراید به‌عنوان یک کاتالیزور رایج است و منجر به تولید اسید در زمان انعقاد چسب می‌شود و با کاهش pH به واکنش تراکمی چسب سرعت می‌بخشد (Comyn, 2002؛ Dong-bin *et al*., 2006)، فرم‌آلدهید آزاد در چسب‌های با نسبت مولی پایین به میزان کمی وجود دارد که این امر موجب کاهش سرعت انعقاد چسب می‌شود. این موضوع عامل محدودکننده‌ای برای استفاده از چسب‌های با

نسبت مولی کم در تولید تخته‌ها به‌ویژه توسط دستگاه‌های پرس نوسازی‌نشده به‌شمار می‌رود.

درمجموع، موضوع کیفیت ماده اولیه سلولزی مورداستفاده و تجهیزات کارخانه‌ای مسئله‌ای است که بر انتشار فرم‌آلدهید تأثیر قابل‌توجهی دارد. در شرایطی که ماده اولیه کیفیت لازم را نداشته باشد و از تجهیزات کارخانه‌ای به‌ویژه پرس فرسوده و مستهلک استفاده شود، به ناگزیر تأمین مقاومت لازم و کاهش زمان پرس با افزایش مصرف چسب و افزایش نسبت فرم‌آلدهید به اوره جبران می‌شود که نتیجه آن افزایش انتشار فرم‌آلدهید خواهد بود.

اصلاح (Modification) چسب با افزودنی‌ها نیز تأثیر چشمگیری در کاهش میزان فرم‌آلدهید آزاد رزین و تخته چندسازه فرم‌آلدهید (پایه) دارد. بنابراین، این راهکار را می‌توان هم در زمان سنتز رزین و هم در ساخت چندسازه‌ها مد نظر قرار داد. ملامین از مهم‌ترین اصلاح‌کننده‌های رزین اوره فرم‌آلدهید به‌شمار می‌رود (Dunky, 1998؛ Young & Kim, 2007). مقاومت به هیدرولیز در رزین MUF به‌دلیل پایداری اتصال N با C ساختار حلقوی شبه‌آروماتیکی ملامین، است (Dunky, 2005). برای کاهش انتشار فرم‌آلدهید در چندسازه‌های چوبی می‌توان از ترکیبات آمینی (آمین‌های دو و سه‌عاملی شامل هگزامتیلن‌دی‌آمین، بیس‌هگزامتیلن‌تری‌آمین و پلی‌پروپیلن‌اکسیدتری‌آمین) در زمان سنتز رزین UF به دو صورت اختلاط هم‌زمان با اوره و فرم‌آلدهید و اختلاط دومرحله‌ای (ابتدا اختلاط آمین با اوره برای تولید یکی از مشتقات اوره و سپس واکنش‌دهی با فرم‌آلدهید) استفاده کرد (Ebewele *et al.*, 1991).

راهکار دیگر برای کاهش انتشار فرم‌آلدهید تیمار حرارتی چندسازه‌ها پس از خروج از پرس است. نتیجه یک تحقیق نشان می‌دهد، تیمار حرارتی در دمای ۶۰°C و رطوبت نسبی ۵۰ درصد، زمانی که از نسبت‌های مولی بالا استفاده شد، باعث کاهش قابل‌توجه در مقدار فرم‌آلدهید تخته شد، درحالی‌که در نسبت‌های مولی کم، مقدار فرم‌آلدهید با قابلیت نشر، آنقدر کم بود که تیمار حرارتی نیز اثر معنی‌داری بر آن نداشت و حتی انتشار فرم‌آلدهید از تخته به مقدار کمی افزایش یافت، چون مقداری از اتصالات تخریب شدند (Que *et al.*, 2007).

استفاده از روکش و پوشش‌های سطحی برای محصول نهایی، یکی دیگر از راهکارها برای کاهش انتشار فرم‌آلدهید است. درواقع، با پرکردن فضاهای خالی و پوشاندن الیاف سلولزی آب‌دوست با مواد آب‌گریز می‌توان از ورود مولکول‌های آب به درون پانل جلوگیری کرد. این راهکار علاوه‌بر پرداخت نهایی پس از خروج تخته از پرس، در هنگام مصرف نیز امکان‌پذیر است. استفاده از روکش‌ها به‌ویژه حاوی خورنده‌های فرم‌آلدهید به کاهش انتشار فرم‌آلدهید می‌انجامد (Nemli & Colakoglu, 2005). Nemli و Colakoglu (۲۰۰۵)، نشان دادند، روکش آغشته به ملامین از طریق کاهش تخلخل سطحی و نفوذ کمتر رطوبت، همچنین خاصیت آب‌گریزی و استحکام ملامین، به‌طور معنی‌داری انتشار فرم‌آلدهید را کاهش می‌دهد. از پوشش‌دهی سطحی بخش‌هایی که روکش روی آنها قرار ندارد نیز، می‌توان برای کاهش انتشار فرم‌آلدهید استفاده کرد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸)، که یکی از راهکارهای ساده به‌شمار می‌رود. بدین منظور از طیف وسیعی مواد به صور محلول، مایع، رنگ، لاک و اسپری استفاده می‌شود. البته باید اطمینان حاصل کرد که ماده مورداستفاده توسط مراجع معتبر، آلاینده نباشند. در این خصوص باید از پوشش‌دهنده‌های مناسب و غیرمضر استفاده شود.

درواقع تخته‌ای که تمام سطوح و لبه‌های آن به‌نحو درست و مناسبی روکش شود، انتشار بسیار کمی فرم‌آلدهید نسبت به تخته روکش‌نشده دارد. چون روکش مورداستفاده لایه کاغذی است که با رزین ملامین–اوره فرم‌آلدهید اشباع می‌شود و ازآنجایی‌که رزین موصوف از استحکام خوبی برخوردار بوده، همچنین مقاوم به رطوبت است، تخته را از جذب رطوبت و درنتیجه از شکست اتصالات بر اثر هیدرولیز (واکنش منتج به آزادسازی فرم‌آلدهید) محافظت می‌کند. همچنین از خروج فرم‌آلدهید آزادشده به بیرون از تخته و ورود به محیط‌زیست مسکونی جلوگیری می‌کند. بااین‌حال بروز درز و شکاف، هرچند کوچک، به‌ویژه در زوایای تخته باعث کاهش کارایی روکش می‌شود. بنابراین، رعایت اصول نگهداری و استفاده از پوشش‌دهنده‌ها در طول دوره مصرف اهمیت دارد.

در حال حاضر، کشورهای توسعه‌یافته در حال ساخت تخته‌ها با چسب اوره فرم‌آلدهیدی هستند که انتشار فرم‌آلدهید در آنها به صفر می‌رسد و با عنوان E° شناخته می‌شوند. در تولید این نوع از چسب، از نسبت بهینه فرم‌آلدهید به اوره (که به‌تازگی به کمتر از یک کاهش یافته است) استفاده می‌شود. همچنین شرایط نگهداری تخته‌ها بسیار مهم است که در معرض رطوبت قرار داده نشوند.

حرکت دیگر جهانی به سمت تولید چسب‌های جایگزین اوره فرم‌آلدهید نظیر گلیوکسال اوره و سویاست که مشکل انتشار فرم‌آلدهید را ندارند.

رعایت استانداردهای تولید که پیش‌ازاین به آنها اشاره شد، به همراه مشارکت و آگاهی عمومی دارای اهمیت بسیار زیادی است. ازآنجایی‌که استفاده درست و نگهداری محصولات چوبی ارتباط نزدیکی با حفظ جنگل‌ها و سلامت محیط‌زیست دارد، آموزش و آگاهی مردم دارای اهمیت بسیار زیادی است. از طرف دیگر آگاه نمودن عموم از مضرات فراورده‌های چوبی که به‌دلیل استفاده بیش از حد مواد شیمیایی ساخته شده‌اند، مانند محصولاتی نظیر تخته‌خرده‌چوب و تخته‌فیبر نیمه‌سنگین (MDF) می‌تواند در تولید محصولات باکیفیت‌تر و سالم‌تر مؤثر واقع شود.

روش‌های اصلاح سازگار با محیط‌زیست چوب ماسیو

استفاده از روش‌های سازگار با محیط‌زیست در اصلاح چوب به‌عنوان وسیله‌ای برای بهبود برخی از خواص چوب در اروپا به جای استفاده از مواد سمی برای اصلاح چوب پذیرفته شده است، به‌طوری‌که می‌توان، پیشرفت‌های اصلی را در ارتقای ثبات ابعادی و دوام طبیعی چوب مشاهده کرد. در این ارتباط سالانه محصولات چوبی اصلاح‌شده بیشتری، تجاری و برای طیف وسیعی از مصارف در دسترس قرار داده شده‌اند.

یکی از این روش‌ها اصلاح حرارتی چوب است. در رابطه با این روش باید احتیاط‌هایی را در نظر گرفت، یکی در کارخانه که کارکنان در معرض ترکیبات آلی فراری هستند که طی فرایند حرارتی از چوب آزاد می‌شوند و دیگری محصول چوبی تیمارشده حرارتی یا گرماچوب (ترموود) که باید مدت زمانی پس از تولید مورد استفاده قرار گیرد، این برای آن است

که ترکیبات آلی فرار مانند فورفورال که حاصل تجزیه سلولز و همی‌سلولز هستند، از محصول خارج شوند.

روش اصلاح حرارتی

هرچند که این تیمار جنبه فیزیکی دارد، اما منتج به تغییر ماهیت شیمیایی در چوب می‌شود. چون از یک سو بخش آمورف سلولز کاهش و بخش کریستالیته آن افزایش می‌یابد و از سوی دیگر گروه‌های آب‌دوست یا هیدروکسیل آن بلوکه می‌شوند. درنتیجه رطوبت‌پذیری چوب کاهش و ثبات ابعادی آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر از قابلیت تغذیه چوب توسط عوامل مخرب بیولوژیک کاسته می‌شود. ازاین‌رو، این روش در مواردی جایگزین مناسبی برای اصلاح چوب با مواد سمی برای استفاده در فضای باز نیز به‌شمار می‌رود.

Hill (2005) و Fengel و Wenger (1989)، روند تجزیه سلولز و همی‌سلولز را مطابق شکل ۹ ارائه دادند.

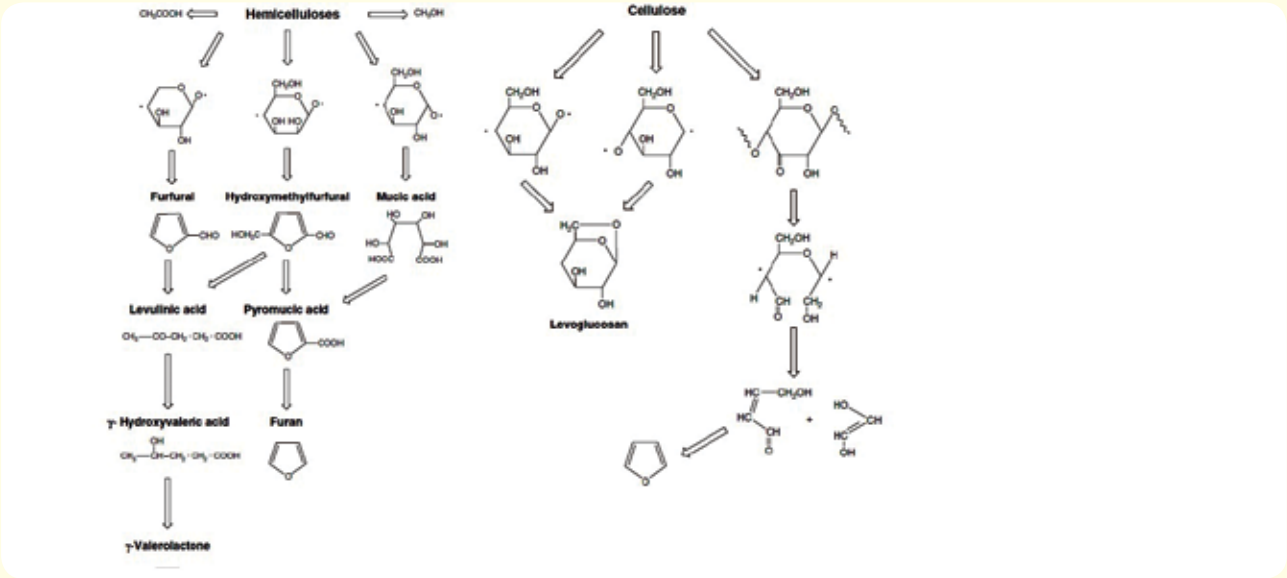
Adamová و همکاران (۲۰۲۰)، به این نتیجه رسیدند که فرایندهای حرارتی، انتشار VOC را از چوب سوزنی‌برگان کاهش می‌دهد. در چوب تیمارشده حرارتی سوزنی‌برگان، انتشار ترپن‌های فرار و هگزانال به شدت کاهش می‌یابد، درحالی‌که انتشار استیک‌اسید و فورفورال افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه، در چوب تیمارشده حرارتی پهن‌برگان، می‌توان انتشار کمتر هگزانال و پنتانال و بیشتر اسیداستیک و فورفورال و سایر ترکیبات را مشاهده کرد. ازآنجایی‌که فورفورال ماده‌ای زیان‌آور برای سلامتی انسان است، از مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی خواص انتشار چوب اصلاح‌شده حرارتی تحت شرایط مختلف استفاده می‌شود، تا پس از آنکه انتشار اسیداستیک و فورفورال به حد مجاز رسید در محیط‌های مسکونی استفاده شود.

یکی از نتایج تیمار حرارتی به‌ویژه در دامنه دمایی (۱۸۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) مورداستفاده برای تولید گرماچوب، کاهش جرم ناشی از تجزیه کربوهیدرات‌ها (بیشتر همی‌سلولز) است. به‌علاوه، تیمار حرارتی باعث تغییراتی در ساختار آناتومی چوب می‌شود، دو عامل موصوف باعث کاهش خواص مکانیکی (مقاومتی) چوب می‌شوند. در این ارتباط می‌توان به گزارش تحقیقاتی Boonstra (۲۰۰۸)، رجوع کرد. این گزارش، حساسیت پارانشیم‌های اشعه چوبی و سلول‌های اپیتلیال پیرامون کانال‌های صمغی به حرارت در چوب کاج رادیاتا را مطرح کرد که بر مقاومت‌های چوب تأثیر منفی دارد. همچنین، به ضعف سلول‌های پارانشیم اشعه درون‌چوب سوزنی‌برگان اشاره شد که به لیگنینی‌شدن تمایل کمی دارند و درنتیجه سلول‌های پارانشیمی با دیواره نازک و بدون لیگنین تشکیل می‌دهند که حساس به رطوبت و فشار بالا هستند. در این رابطه، یکی از عوامل کاهش مقاومت چوب کاج رادیاتا، بخش جوان چوب آن عنوان شد که دارای همی‌سلولز بیشتر به همراه زاویه بالاتر میکروفیبریل است که درنتیجه به لایه‌لایه‌شدن دیواره سلولی چوب کاج رادیاتا پس از تیمار حرارتی می‌انجامد. بنابراین، می‌توان استنباط کرد، چوب کاج رادیاتا تا چه حد از تیمارهای حرارت و فشار در ارتباط با خواص مکانیکی تأثیر منفی می‌پذیرد. شایان ذکر اینکه تیمار حرارتی مورداستفاده، مقاومت به ضربه را در چوب کاج رادیاتا در مقایسه با چوب کاج جنگلی با نرخ به مراتب بیشتری کاهش داد (۸۰ در مقابل ۵۶ درصد). در رابطه با چوب صنوبر، حساسیت چوب گونه‌های پهن‌برگ به کولاپس آوند و تغییرشکل‌های فیبر لیبری‌فرم اشاره شد که شکستگی عمود بر الیاف را در آنها قابل‌توجه می‌کند و باعث کاهش مقاومت‌ها ازجمله مقاومت به ضربه می‌شود.

بنابراین باید، به این نکته که در چه شرایطی از این محصول متناسب با ضخامت آن می‌توان استفاده نمود، توجه شود.

به‌هرحال تیمار حرارتی به‌عنوان فرایندی که باعث افزایش حفاظت چوب در مقابل عوامل مخرب بیولوژیک و تغییرات رطوبتی می‌شود، سبب طولانی‌ترشدن مدت استفاده از محصول چوبی می‌شود. درنتیجه فشار بهره‌برداری از جنگل را محدود می‌کند.

ازنظر Candelier و Dibdiakova (۲۰۲۰)، فرایندهای اصلاح حرارتی



شکل ۹- تجزیه حرارتی سلولز (راست) و همی‌سلولز (چپ) (Fengel & Wegener, 1989)

از پتانسیل قوی برای تولید مواد چوبی سازگار با محیط‌زیست برخوردارند. آنها همچنین به این موضوع اشاره کردند که در طول فرایند تولید برخی از ترکیبات فرار سمی می‌شوند، اما راه‌حل‌هایی برای بازیابی و ارزش‌گذاری این محصولات می‌تواند به بهبود جنبه سازگار با محیط‌زیست فرایندها، همچنین مزایای اقتصادی آنها منجر شود.

روش اصلاح شیمیایی

در این روش واکنش شیمیایی میان گروه‌های هیدروکسیل چوب با یک ماده شیمیایی روی می‌دهد که نتیجه آن تغییر ماهیت شیمیایی چوب است. چنین واکنشی می‌تواند به چند طریق انجام شود. یکی اینکه گروه‌های هیدروکسیل چوب به‌عنوان بخش آب‌دوست با گروه‌های آب‌گریز جایگزین شوند. دیگری با ورود مونومر به حفرات و دیواره سلولی شکل می‌گیرد و پس از پلیمرشدن مونومر طی فرایند مربوطه با سلولز پیوند برقرار می‌کند. در روش‌های دیگر، گروه‌های هیدروکسیل چوب حذف یا مهار می‌شوند.

یکی از روش‌هایی که جنبه تجاری بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، استیلاسیون است. این فرایند مستلزم واکنش چوب با یک عامل استیله‌کننده (مانند انیدریداستیک یا کتن) است که منجر به استری شدن بسیاری از گروه‌های هیدروکسیل در چوب می‌شود. درنتیجه، چوب بسته به میزان استیله‌شدن گروه‌های هیدروکسیل چوب در این فرایند، آب‌گریز و ازنظر ابعادی پایدارتر می‌شود. در شکل ۱۰ واکنش استیلاسیون چوب نمایش داده شده است

این روش علاوه‌بر افزایش ثبات ابعادی باعث بهبود دوام طبیعی چوب می‌شود که به جای اشباع چوب با مواد شیمیایی سمی و زیان‌آور در حال استفاده است و جایگزین مناسب سازگار با محیط‌زیست به‌شمار می‌آید. استیلاسیون به‌عنوان رایج‌ترین شکل اصلاح شیمیایی شناخته می‌شود که چندین دهه پیش در مقیاس آزمایشگاهی کارکرد مثبت خود را نشان داد و در حال حاضر به مرحله تجاری رسیده است. در شکل ۱۱ تجاری‌سازی این روش در دو کشور اروپایی هلند (راست) و سوئد (چپ) مشاهده می‌شود.

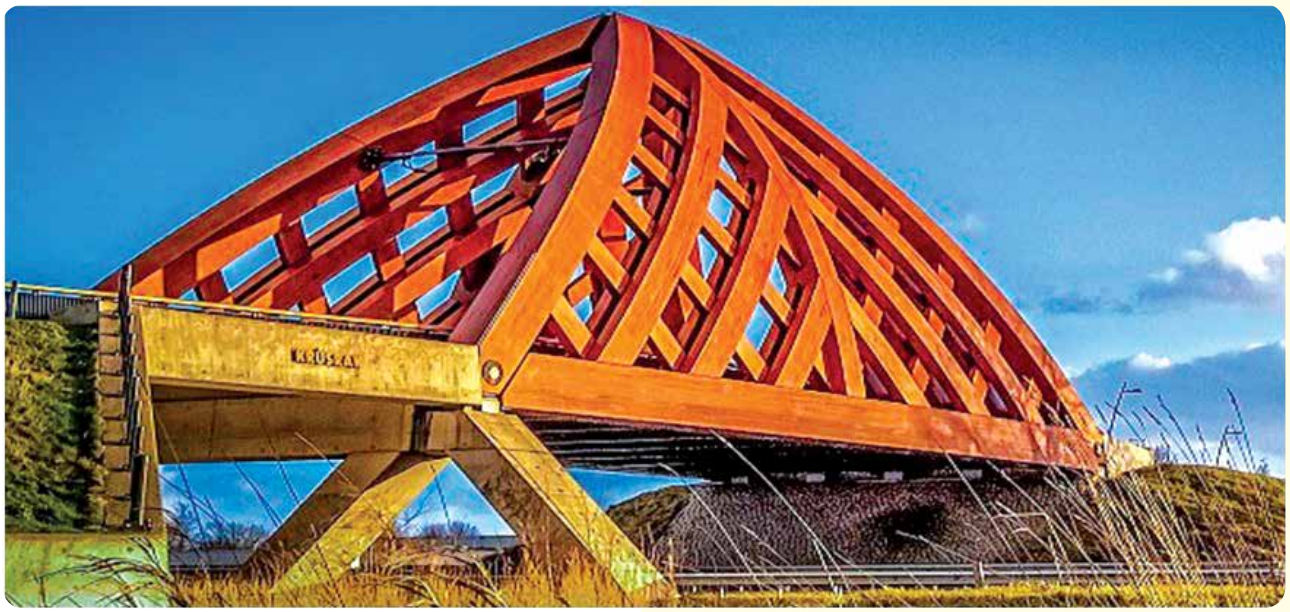
در شکل ۱۲ استفاده از چوب استیله در ساخت یک سازه چوبی مشاهده می‌شود. در این سازه، چوب مورداستفاده به‌خوبی استیله شد و مقاومت بیولوژیک بسیار خوبی را نشان داد.

استفاده از مواد ژئوتکستایل و املاح شور

Müller (۲۰۱۸)، تحقیق مفصلی را روی تیمارهای جایگزین برای چوب مورداستفاده در تأسیسات دریایی انجام داد. نتیجه تحقیق استفاده از فرمولاسیون املاح نمکی مناسب نشان داد، غلظت ۱۵ کیلوگرم از آن در محلول اشباع یک مترمکعب آب، مقاومت بسیار زیادی را در مقابل عوامل بیولوژیک دریایی ایجاد می‌کند. به‌علاوه استفاده از مواد ژئوتکستایل به‌عنوان پوشش سطح چوب به جای مواد سمی، راهکار

شکل ۱۰- واکنش اصلی استیلاسیون چوب با انیدریداستیک (Sandberg *et al.*, 2020)

شکل ۱۱- کارخانه استیلاسیون در هلند (راست) و سوئد (چپ)



شکل ۱۲- پل چوبی ساخته‌شده توسط چوب استیله در اسنیک (Sneak)، هلند

شکل ۱۳- پوشش‌دهی نمونه‌آزمایشی با ژئوتکستایل (Müller, 2018)

مؤثری در حفاظت چوب در تأسیسات دریایی معرفی می‌شود. شکل ۱۳ پوشش‌دهی نمونه‌های آزمایشی چوب را برای استفاده در تأسیسات دریایی نشان می‌دهد

نتیجه‌گیری

از محتوای این نوشتار، می‌توان به این نتیجه رسید که حرکت جهانی، در مسیر تولید فراورده‌های چوبی سازگار با محیط‌زیست و سلامتی انسان قرار دارد. مقررات و قوانین با نظارت دقیق و سخت‌گیرانه به همراه آگاهی عمومی، صنعت چوب را وادار ساخته است که روش‌های سالم را جایگزین استفاده از مواد سمی کند. در رابطه با انتشار فرم‌آلدهید که یکی از چالش‌های مهم تولید چندسازه‌های چوبی چسب‌پایه به‌شمار می‌رود، کشورهای توسعه‌یافته، آیین‌نامه‌ها و ممنوعیت‌هایی را در تولید تخته با مقدار انتشار فرم‌آلدهید بیش از حد مجاز وضع و به اجرا گذارده‌اند، ضمن آنکه کوشش‌هایی را برای جایگزینی چسب اوره فرم‌آلدهید با چسب‌های عاری از انتشار فرم‌آلدهید سرلوحه فعالیت‌های پژوهشی و اجرایی خود قرار داده‌اند.

منابع

احمدی، م.، معزی‌پور آ. و معزی پور، ب.، ۱۳۹۸. بررسی روش‌های مختلف کاهش انتشار فرم‌آلدهید از فراورده‌های مرکب چوبی. اولین کنفرانس بین‌المللی و چهارمین کنفرانش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط‌زیست (تاریخ برگزاری: ۶-۵ شهریور ۱۳۹۸، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل)، تعداد صفحات ۱۳.

Adamová, T., Hradecký, J. and Pánek, M., 2020. Volatile Organic Compounds (VOCs) fromWood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation Polymers, 12: 2289.

Adhikari., S. and Ozarska., B., 2018. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process “From Sawmill to Final Products”. Environ Syst Res., 7: 6.

Andersen, R. and Lundquist, L.M., 1975. Indoor air pollution due to chipboard used as a construction material, Atmos. Environ., 9: 1121-1127.

ATSDR (National Center for Environmental Health Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2010.

Boonstra, M.J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B.F. and Kegel, E.V., 2007. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. Ann. For. Sci., 64: 679–690.

Boonstra, M., 2008. A two-stage thermal modification of wood. PhD Thesis, Gent University, Belgium, 297p.

Candelier, K. and Dibdiakova, J., 2020. A review on life

Reactivity, chemical structure, and molecular mobility of urea–formaldehyde adhesives synthesized under different conditions using FTIR and solid-state 13C CP/MAS NMR spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science, 88(11): 2677-2687.
Park, J. and Ikeda, R., 2006. Variations of formaldehyde and VOC levels during 3 years in new and older homes. Indoor Air, 16: 129–135.
Persily, A., Musser, A. and Emmerich S., 2010. Modeled infiltration rate distributions for U.S. housing. Indoor Air, 20(6): 473-485.
Pizzi, A., 1989. Wood Adhesives: Chemistry and Technology. Marcel Dekker Incorporated, New York, 432 p.
Que, Z., Furuno, T., Katoh, S. and Nishino, Y., 2007. Effects of urea–formaldehyde resin mole ratio on the properties of particleboard. Building and Environment, 42(3): 1257-1263.
Rumchev, K.B., Spickett, J.T., Bulsara, M.K., Phillips, M.R. and Stick, S.M., 2002. Domestic exposure to formaldehyde significantly increases the risk of asthma in young children. European Respiratory Journal, 20(2): 403-408
Rybin, B., Safin, R., Zavrazhnova, I., Mukhametzyanov, S., Rybin, D. and Gazizulina, A., 2019. Chemical Safety of Furniture Products Coatings, 9: 708.
Salthammer, T., Mentese, S. and Rainer, M., 2010. Formaldehyde in the Indoor Environment. Chem. Rev., 110(4): 2536-2572.
Sandberg, D., Kutnar, A. and Mantanis, G., 2017. Wood modification technologies– a review. iForest, 10: 895-908.
Wiglusz, R., Sitko E., Nikel, G., Jarnuszkiewicz, I. and Igielska, B., 2002. The effect of temperature on the emission of formaldehyde and volatile organic compounds (VOCs) from laminate flooring case study. Building and Environment, 37(1): 41-44.
William, S., 2017. Effects of Temperature on the Emission Rate of Formaldehyde from Medium Density Fiberboard in a Controlled Chamber, Graduate Theses and Dissertations, available at: http://scholarcommons.usf.edu/etd/6960
Wolkoff, P. and Nielsen, G.D., 2010. Non-cancer effects of formaldehyde and relevance forsetting an indoor air guideline. Environ. Int, 36: 788–799.
World Health Organization (WHO), 2010. Guidelines for Indoor Air Quality: SelectedPollutants, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
Young, N.B. and Kim M.G., 2007. Evaluation of melamine-modified urea-ormaldehyde resins as particleboard binders. Journal of Applied Polymer Science, 106(6): 4148-4156.
cycle assessments of thermally modified wood. Holzforschung, 75(3): 0102.
Chen, Z., Shi, J., Shen, X., Ma, Q. and Xu, B., 2016. Study on formaldehyde emissions from porous building material under non-isothermal conditions. Applied Thermal Engineering, 101: 165-172.
Chuck, y. and Kim, J.T., 2012. Long-term Impact of Formaldehyde and VOC Emissions from Wood-based Products on Indoor Environments; and Issues with Recycled Products. Indoor and Built Environment, 21(1):137-149.
Comyn, J., 2002. The chemistry of adhesives. Surface coatings international, 85(2): 259-264.
Dunky, M., 1998. Urea–formaldehyde (UF) adhesive resins for wood, International Journal of Adhesion and Adhesives, 18(2): 95-107.
Dunky, M., 2005. Resins for ultra-low formaldehyde emission according to the Japanese F**** quality. Proceedings of the Wood Adhesives, 30(4): 343-349.
Ebewele, R.O., River, B.H., Myers, G.E. and Koutsky, J.A., 1991. Polyamine-modified urea-formaldehyde resins. II. Resistance to stress induced by moisture cycling of solid wood joints and particleboard. Journal of Applied Polymer Science, 43(8): 1483-1490
Frihart, C.R., Chaee, T.L. and Wescott, J.M., 2020. Long-Term Formaldehyde Emission Potential from UF- and NAF-Bonded Particleboards. Polymers, 12(8): 1852.
Garrett, M.H., Hooper, M.A., Hooper, B.M., Rayment, P.R. and Abramson, M.J., 1999. Increased risk of allergy in children due to formaldehyde exposure in homes. Allergy, 54(4): 330-337.
Fengel, D. and Wegener, G., 1989. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter De Gruyter, Berlin, Germany, 612p, https://doi.org/10.1515/9783110839654.fm.
Hill, A.S.C., 2006. Wood Modification Chemical, Thermal and other processes. John Wiley and Sons PRESS, England, pp: 99-127.
Hun, D.E., Siegel, J.A., Morandi, M.T., Stock, T.H. and Corsi, R.L., 2009. Cancer risk disparities between Hispanic and non-Hispanic White populations: the role of exposure to indoor air pollution. Environmental Health Perspectives, 117: 1925– 1931.
Kelly, T.J., Smith, D.L. and Satola, J., 1999. Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes. Environmental Science and Technology, 33(1): 81-88.
Kocaefe, D., Younsi, R., Poncsak, S. and Kocaefe,Y., 2007. Comparison of different models for the hightemperature heat-treatment of wood. International Journal of Thermal Sciences, 46: 707-716.
Liang, W., Yang, S. and Yang, X., 2015. Long-term formaldehyde emissions from medium-density fiberboard in a full-scale experimental room: emission characteristics and the effects of temperature and humidity. Environ. Sci. Technol., 49: 10349-10356.
Nemli G. and Çolakoglu G., 2005. The influence of lamination technique on the properties of particleboard. Building and Environment, 40(1): 83-87.
Müller, J., 2018. Praxisnahe Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser Aktenzeichen: 32571-0132, Projektlaufzeit: 15.04.2015 bis 30.06.2018.
Mayers, G.E., 1985. Effect of separate additions to furnish or veneer on formaldehyde emission and other properties: a literature review. Forest Products Journal, 35(6): 57-62.
Park, B.D., Kim, Y.S., Singh, A.P. and Lim, K.P., 2003.