

بررسی اثر پلاسمای گلاید تپی با گاز متان بر روی آبگریزی سطح چوب صنوبر

افسانه توپا^۱، عطاملک قربانزاده^۲ و داود افهامی سیسی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترای رشته علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، ایران.

۳- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، پست الکترونیک: efhami@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۹

چکیده

با توجه به شرایط تیمار و نوع گاز استفاده شده، پلاسمای اثرهای متفاوتی بر روی نپذیری سطح چوب دارد. گازهای هیدروکربنی معمولاً باعث از بین رفتن گروه‌های آبدوست سطح شده و با ایجاد ساختارهای زبر میکروسکوپی موجب آبگریزی می‌شوند. در این تحقیق از تیمار پلاسمای گلاید همراه با گاز متان به منظور آبگریزی سطح چوب و ایجاد مقاومت در برابر هوازدهگی استفاده شد. چوب صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) در شرایط مختلف آزمایشگاهی مانند زمان، ولتاژ، فرکانس، فاصله بین الکترودها و جریان ورودی و خروجی گاز در داخل یک راکتور با گاز متان در معرض پلاسمای گلاید قرار گرفت. سپس ویژگی‌های سطح چوب با استفاده میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه‌گیری و زاویه تماس قطره آب، طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی (ATR-FTIR)، زیرسنجی و رنگ‌سنجی مطالعه شد. پس از آن نمونه‌ها با استفاده از چرخ هوازدهگی گاردنر در معرض هوازدهگی تسریع شده قرار گرفتند و دوباره ویژگی‌های آنها بررسی شد. بررسی تصاویر الکترونی نشان داد که پلاسمای باعث ایجاد لایه زگیلی‌مانند روی سطح چوب می‌شود و می‌تواند بر اثر رسوب مواد جدید و یا اثرهای فیزیکی پلاسمای (حکاکی سطح) باشد. تیمار پلاسمای باعث افزایش قابل توجه زاویه تماس قطره آب بر روی سطح نمونه‌ها شد. نمونه‌های تیمار شده سطح زیرتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. سطح نمونه‌های تیمار شده به‌طور کلی تیره‌تر از نمونه شاهد بود. پس از اعمال هوازدهگی بر روی نمونه‌ها، اثرگذاری تیمارها بر روی آبگریزی سطح تا حد زیادی از دست رفت. سطوح تیمار شده بر اثر هوازدهگی، تغییرات زبری کمتری نسبت به شاهد داشتند و رنگ تیره آنها نیز بعد از هوازدهگی به نقره‌ای رنگ تغییر یافت. استفاده از پلاسمای گلاید گاز متان قابلیت زیادی برای ایجاد سطوح آب‌گریز بر روی سطح چوب نشان داد، اما این لایه دوام چندانی نداشته و بر اثر هوازدهگی اثر خود را از دست داد.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای، هوازدهگی، زاویه تماس، تغییرات رنگ، تغییرات زبری، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

مقدمه

و انسان ممنوع شده و روزبه‌روز از مصرف آنها کاسته می‌شود (Freeman et al., 2003). در این راستا طی دهه گذشته، تحقیقات زیادی برای حفاظت محصولات چوبی و اصلاح سطح آنها با استفاده از پلاسمای انجام شده است (Clausen et al., 2011) که به دلیل هزینه پایین، استفاده آسان و دوستدار

در دهه‌های گذشته تغییرات شگرفی در زمینه حفاظت چوب و کاربرد مواد حفاظتی ایجاد شده است. امروزه استفاده از مواد حفاظتی قدیمی مانند پنتاکلوروفنل، کربنوزوت و آرسنات مس‌کرومی شده به علت اثرهای سوء بر محیط‌زیست

موجب واکنش‌های اکسیداسیون در سطح چوب شده و باعث از بین رفتن و تخریب زنجیره‌های سلولزی می‌شوند (Wolkenhauer *et al.*, 2009).

در نتیجه وزن مولکولی سلولز کاهش یافته و گروه‌های آلدهیدی تولید می‌کند که موجب افزایش نم‌پذیری در سطح چوب می‌شود (Vander Wielen *et al.*, 2006). اعمال پلاسما بر روی سطح چوب با استفاده از گازهای غیرآلی نیز موجب نم‌پذیری می‌شود. علت این موضوع، واکنش‌های اکسیداسیونی است که منجر به تشکیل گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل، آلدهید و دیگر گروه‌های قطبی در سطح چوب می‌شود (Acda *et al.*, 2012) و گروه‌های غیرقطبی مانند C=C و C-H در سطح چوب کاهش یافته (Wolkenhauer *et al.*, 2008) و در نتیجه نم‌پذیری و نفوذ چوب نسبت به مایعات افزایش می‌یابد (Sarmadi *et al.*, 1996). پلاسما با گازهای غیرآلی (مانند هوای اتمسفری) باعث افزایش نم‌پذیری سطحی چوب و در نتیجه چسبندگی بهتر چسب‌ها و پوشش‌ها می‌شود (Reinprecht, 2016).

Avramidis و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که تیمار پلاسما با استفاده از گازهای هیدروکربنی مانند متان به دلیل از بین رفتن مواد استخراجی و لایه‌های مرزی ضعیف، نم‌پذیری را کاهش داده و باعث آب‌گریز شدن سطح چوب می‌شود (Avramidis *et al.*, 2012).

در این تحقیق برای اولین بار از پلاسما گلاید تپی در محیط گاز متان برای تیمار سطح چوب استفاده شد. از تجهیزات آزمایشگاه تحقیقاتی پلاسما واقع در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران برای اجرای این تحقیق استفاده گردید. پلاسما در حالت گلاید تپی از دو الکتروود و اگر استفاده می‌کند. با اعمال ولتاژ بالا به الکتروودها، تخلیه الکتریکی در کوچک‌ترین فاصله بین دو الکتروود شکل می‌گیرد و ضمن جاروب فضای بین دو الکتروود به سمت جاهایی که الکتروودها فاصله بیشتر دارند حرکت خزننده انجام می‌دهد. در پلاسما شکل گرفته، الکترون‌های پر انرژی نقشی اساسی را ایفا می‌نمایند و عامل اصلی ایجاد برانگیختگی، تابش و شکست مولکولی هستند. هدف از این مطالعه بررسی اثر پلاسما

محیط‌زیست بودن، مورد توجه محققان زیادی برای اصلاح خواص چوب قرار گرفته است (Demirkir *et al.*, 2014).

پلاسما حالت چهارم ماده بوده و از یک گاز یونیزه شامل الکترون‌ها، یون‌ها، فوتون‌ها و ذرات خنثی تشکیل می‌شود. این ذرات فعال باعث ایجاد حالت‌های برانگیخته در اتم‌ها و مولکول‌ها می‌گردد که از آن طریق، برهم‌کنش‌های شیمیایی و فیزیکی در مواد ایجاد می‌کند (Becker & Belkind, 2003). با توجه به درجه یونیزاسیون و انرژی داخلی سیستم، پلاسما به دو دسته پلاسما حرارتی و پلاسما غیرحرارتی تقسیم می‌شود (Schwanninger *et al.*, 2004). پلاسما حرارتی در دمای بالا (۵۷۲۶-۷۲۶ کلوین) و پلاسما غیرحرارتی در دمای معمولی و یا نزدیک به دمای اتاق عمل می‌کند. البته برای اصلاح سطح چوب فقط از پلاسما غیرحرارتی استفاده می‌شود. انواع پلاسماهای غیرحرارتی شامل تخلیه کرونا، تخلیه مانع دی‌الکترونیک، تخلیه تابشی، تخلیه مایکروموج با توان کم و متوسط، تخلیه تپی تکرار شونده و پلاسما گلاید می‌باشند. در حالی که پلاسماهای حرارتی در پلاسما ترون‌ها، قوس الکتریکی جریان بالا پیوسته و تپی (پالسی)، پلاسما درون توکاماک‌ها برای تولید انرژی هسته‌ای از نوع همجوشی، تخلیه پر انرژی مایکروموج در فشار اتمسفر و لامپ‌های قوس الکتریکی اتفاق می‌افتند (Zille *et al.*, 2015).

اثر پلاسما روی سطوح چوبی شامل: (۱) افزایش نم‌پذیری (Avramidis *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2009) یا کاهش نم‌پذیری (Moghaddam *et al.*, 2016; Poaty *et al.*, 2013)، (۲) بهبود مقاومت به هوازدگی (Gascón-Garrido *et al.*, 2016)، (۳) افزایش مقاومت به آتش (Pabeliña *et al.*, 2012)، (۴) استریل و کشتن ریز موجودات زنده موجود بر روی چوب (Gascón-Garrido *et al.*, 2017) است. علاوه بر آن از تیمار پلاسما می‌توان برای اصلاح چندسازه‌های چوبی به منظور افزایش چسبندگی بین ذرات چوبی یا بین ذرات چوبی و غیر چوبی تشکیل‌دهنده چندسازه استفاده کرد (Altgen *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2013).

همان‌طور که اشاره شده است پلاسما تأثیری دوگانه بر روی ترشوندگی سطح چوب دارد. برخی از تیمارهای پلاسما

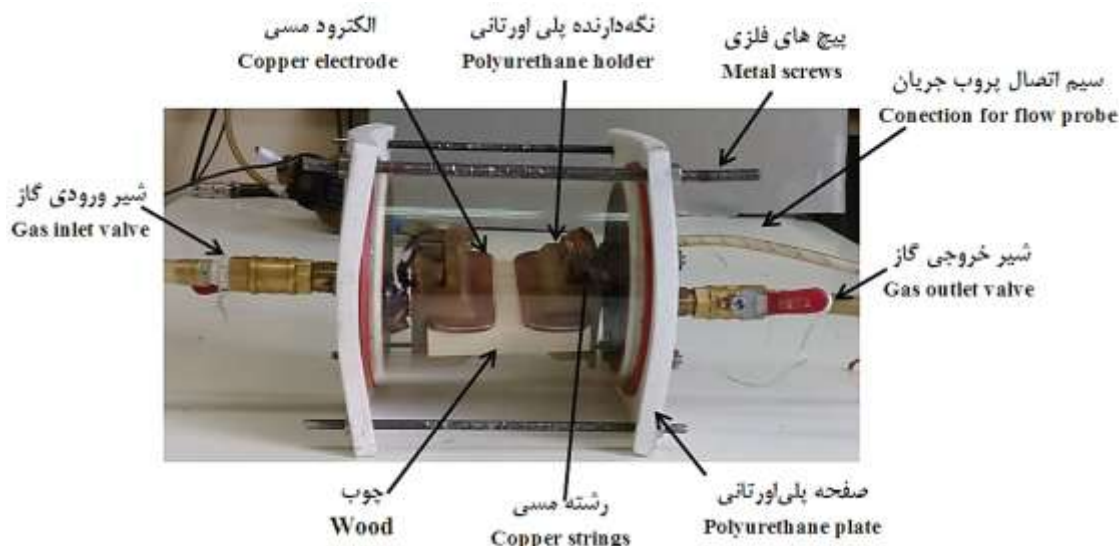
مساوی یا بیشتر از ۹۹/۹۹ درصد (گرید تجاری ۵) بود. ناخالصی گاز مورد استفاده شامل ترکیبی از گازهای نیتروژن (۱۵ ppmv)، اکسیژن (۵ ppmv)، هیدروژن (۱ ppmv) و بخار آب (۵ ppmv) و OHC (۲۰ ppmv) بود. تیمار پلاسمای در داخل یک راکتور انجام شد (شکل ۱) که دارای دو الکترود تخت مسی است که یک الکترود به مولد تپ‌های تکرار شونده ولتاژ بالا و دیگری به زمین متصل می‌شود. مولد پالس (تپ) خود از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا تغذیه می‌کند. این آرایش آزمایشگاهی مجهز به تجهیزاتی شامل اسپلوسکوپ دیجیتال چهارکاناله، پروب‌های ولتاژ و جریان و فلومتر برای شناسایی پارامترهای الکتریکی (شامل شناسایی تپ‌های جریان و ولتاژ) و شارش گاز در خروجی راکتور بود.

گلاید گاز متان بر روی آب‌گریزی سطح چوب صنوبر است. میزان دوام تیمارهای انجام شده دوباره پس از هوازدگی تسریع شده بررسی شدند. با توجه به دوست‌دار محیط‌زیست بودن تیمارهای پلاسمای و زمان کوتاه اعمال تیمار، به نظر می‌رسد این روش می‌تواند نویدبخش فناوری‌های جدید برای افزایش آب‌گریزی سطوح چوبی باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

گونه چوب مورد استفاده در این تحقیق، صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) بود. نمونه‌های چوبی با ابعاد $80 \times 14 \times 70 \text{ mm}^3$ (مماسی \times شعاعی \times طولی) تهیه شدند. گاز شیمیایی اصلی مورد استفاده، متان (CH_4) با خلوص



شکل ۱- راکتور استفاده شده برای اعمال تیمارهای پلاسمای

$$f = \frac{V}{t} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن V ، حجم استوانه شیشه‌ای فلومتر و t ، زمان عبور حباب از آن است.

برای اندازه‌گیری شارش گاز چه قبل از شروع پلاسمای و چه در هنگام و یا بعد از آن، از فلومتر صابونی استاندارد استفاده شد. میزان شارش گاز (f) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. واحد جریان به صورت سانتی‌متر مکعب بر دقیقه گزارش شد.

شرح تیمارها

همان‌طور که در جدول ۱ نمایش داده شده است، تیمارهای مختلفی تحت شرایط و پارامترهای متفاوت تجربی شامل فرکانس تکرار تپ‌های پلاسما، زمان تیمار، نوع گاز، ولتاژ اعمالی منبع تغذیه به مولد پالس، شارش‌های مختلف ورودی گاز و فاصله‌های متغیر بین ۲ الکتروود انجام شدند. تیمارهای اشاره شده در جدول ۱ با پیش‌آزمون‌های متعدد انتخاب شدند. تیمارهای منتخب دارای بیشترین اثر بر روی آب‌گریزی سطح و کمترین اثر بر روی کیفیت ظاهری نمونه‌ها بودند. مولد پالس خود از خازن‌های بانک و سویچ‌کننده ولتاژ بالا و تعدادی مقاومت و سلف و اتصالات تشکیل شده بود. تعداد خازن‌های بانک مورد استفاده در هر تیمار، ثابت و ۴ عدد بود. ظرفیت هر خازن ۲۲۰ پیکو فاراد بود که به صورت مجموعه به هم متصل می‌شدند. ظرفیت کل خازن‌های بانک (C) و ولتاژ اعمالی به مولد پالس (V) هر دو انرژی تزریقی هر تپ اعمالی به رآکتور را مطابق رابطه $E = \left(\frac{1}{2}\right) CV^2$ تعیین می‌کنند.

با استفاده از اسیلوگراف‌های جریان و ولتاژ که از پروب‌های جریان و ولتاژ به دست می‌آیند و بهره‌گیری از قابلیت‌های عملیات ریاضی اسیلوسکوپ، انرژی هر تپ محاسبه و با ضرب آن در فرکانس تکرار تپ توان کل تزریقی به رآکتور محاسبه شد. همچنین، از آنجاکه مولکول متان در محیط پلاسما شکسته شده و گازهای هیدروکربنی جدیدی تولید می‌شود و برای تشخیص اینکه تیمار در محیط چه ترکیبی واقعی از گازها انجام می‌دهد، از گاز خروجی از رآکتور در هر آزمایش توسط سرنگ نمونه‌برداری و به دستگاه کروماتوگراف گازی تزریق شد. با استفاده از داده‌های کروماتوگراف گازی میزان تبدیل گاز متان برحسب درصد برآورد شد.

در بخش مشخصه‌یابی نمونه‌ها، ابتدا آزمون‌های زاویه تماس قطره آب، طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، رنگ‌سنجی و زبری‌سنجی بر روی نمونه‌های شاهد و تیمار شده توسط پلاسما انجام شده و پس از قرارگرفتن در معرض هوازدگی، آزمون‌ها دوباره تکرار شدند.

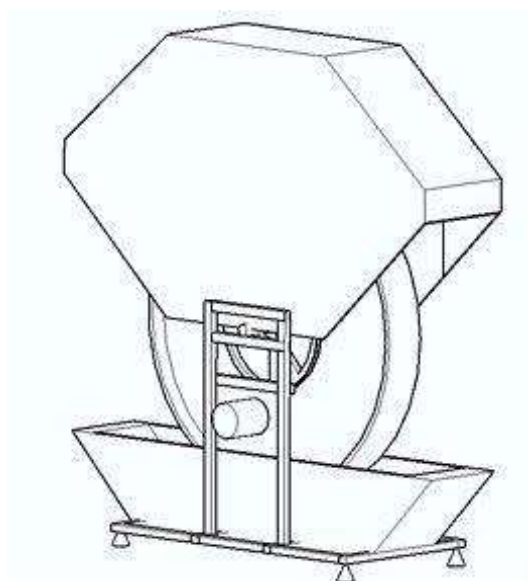
جدول ۱- شرح تیمارهای انجام شده در این تحقیق

ردیف	کد تیمار	فرکانس	ولتاژ	شارش گاز		فاصله بین دو الکتروود	زمان تیمار
				ورودی	خروجی		
		(KHZ)	(KV)	(cm ³ /min)	(cm ³ /min)	(cm)	(min)
۱	$V_{19/5}, f_{i27.22}, f_{o1.054}, D_{1-1/2}, F_{22/5}$	۲۲/۵	۱۹/۵	۷۱	۱۹۱	۱-۱/۲	۷
۲	$V_{18}, f_{i22.94}, f_{o1.010}, D_{1-1/2}, F_{18}$	۱۸	۱۸	۸۳	۱۹۱	۱-۱/۲	۷
۳	$V_{19}, f_{i27.28}, f_{o1.047}, D_{1-1/2}, F_{22}$	۲۲	۱۹	۷۱	۲۷۳	۰/۱-۷/۲	۱۴
۴	$V_{19/3}, f_{i18.2}, f_{o1.047}, D_{1-0.5/7}, F_{22/7}$	۲۲/۷	۱۹/۳	۲۳۹	۴۷۹	۰/۰-۵/۷	۷

آزمون هوازدگی

آزمون هوازدگی توسط چرخ هوازدگی گاردنر به مدت ۷۲۰ ساعت بر روی نمونه‌های تیمار شده و شاهد انجام شد (شکل ۲). هوازدگی توسط این دستگاه نسبت به هوازدگی طبیعی ۱۲ بار سریع‌تر بوده و از سویی نتایج آن نسبت به دستگاه QUV (اتاقک‌های هوازدگی) به هوازدگی طبیعی نزدیک‌تر است (Sarmadi & Denes, 1996). نمونه‌ها بر

روی یک چرخ دوار تثبیت شده و بعد با چرخش آن به‌طور پی‌درپی در معرض لامپ‌های شبیه‌ساز نور خورشید (در قسمت فوقانی دستگاه) و آب (قسمت تحتانی دستگاه) قرار گرفتند. مدت زمان هر چرخه ۹۰ دقیقه بود. لامپ‌های استفاده شده دارای یک پیک قوی در ناحیه طول موج ۳۶۰ نانومتر بودند. نحوه آماده‌سازی و تهیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 927-6 (۲۰۰۶) بود.



شکل ۲- تصویر شماتیک چرخ هوازدگی گاردنر استفاده شده در این تحقیق

به‌وسیله نرم‌افزار Image J زاویه تماس قطره آب اندازه‌گیری شد. برای هر نمونه، سه تکرار انجام شد.

آزمون رنگ‌سنجی

از دستگاه رنگ‌سنجی مدل NRF 145 ساخت کشور چین به‌منظور بررسی تغییرات رنگ سطوح قبل و بعد از هوازدگی استفاده شد. پارامتر ΔE^* (شدت تغییر رنگ) توسط این دستگاه اندازه‌گیری و طبق رابطه ۲ محاسبه گردید. برای هر نمونه دو مرتبه اندازه‌گیری انجام شد.

آزمون‌های بررسی کیفیت سطح چوب قبل و بعد از هوازدگی میکروسکوپ الکترونی روبشی

از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) مدل FEI NOVA NANO SEM 450 برای بررسی ساختار سطوح، اندازه و نحوه قرارگرفتن ذرات در سطح چوب استفاده شد.

زاویه تماس قطره آب

زاویه تماس دینامیک قطره آبی به حجم ۱۰ میکرو لیتر به مدت ۲۰ دقیقه بر روی سطح چوب اندازه‌گیری شد. در فواصل زمانی مختلف تصاویری با کیفیت بالا تهیه شده و بعد

نتایج

کروماتوگرافی گازی

نتایج نشان دادند که در محیط پلاسما ترکیب گاز به طور عمده شامل هیدروژن، استیلن و به مقدار کمتری هیدروکربن‌های سنگین‌تر C_4 و C_6 به عنوان محصولات واکنش شکست مولکول متان و خود متان بود. میزان تبدیل متان به سایر ترکیبات حدود ۹۰ درصد برآورد شد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه‌ها قبل از هوازدگی

نمونه شاهد دارای سطحی صاف بود، در حالی که سطح نمونه‌های تیمار شده حالت زگیلی و دانه‌ای داشت (شکل ۳). حالت زگیلی در سطح نمونه‌های مربوط به تیمار $D_{1-1/2}$ ، $f_{i 27:28}$ ، $f_{i 27:28}$ ، $f_{i 27:28}$ و V_{19} نسبت به تیمار $D_{1-1/2}$ ، $f_{i 10:10}$ ، $f_{i 23:94}$ و V_{18} دارای بهم پیوستگی و یکنواختی بیشتری بود. در تیمار $D_{1-1/2}$ ، $f_{i 10:10}$ ، $f_{i 23:94}$ و V_{18} حالت زگیلی به صورت صفحه‌ای و در تیمار $D_{1-1/2}$ ، $f_{i 7:47}$ ، $f_{i 27:28}$ و V_{19} به شکل دانه‌ای بود. حفره‌ها و ناهمواری‌های ذاتی چوب که به علت ساختار آناتومی آن است، در تصاویر تهیه شده از تیمار شاهد قابل مشاهده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه‌ها بعد از هوازدگی

تصاویر الکترونی سطح نمونه‌ها پس از هوازدگی در شکل ۴ نمایش داده شده است. سطح نمونه شاهد پس از هوازدگی کاملاً دچار تغییر شده و حالت صاف قبل از هوازدگی را نداشت. در سطح نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده، ترک‌های میکروسکوپی زیادی دیده شد.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta l^*)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن تغییرات فاکتور Δa^* (تغییرات قرمزی)، Δb^* (تغییرات زردی) و Δl^* (تغییرات روشنائی) نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدگی است.

آزمون زبری سنجی

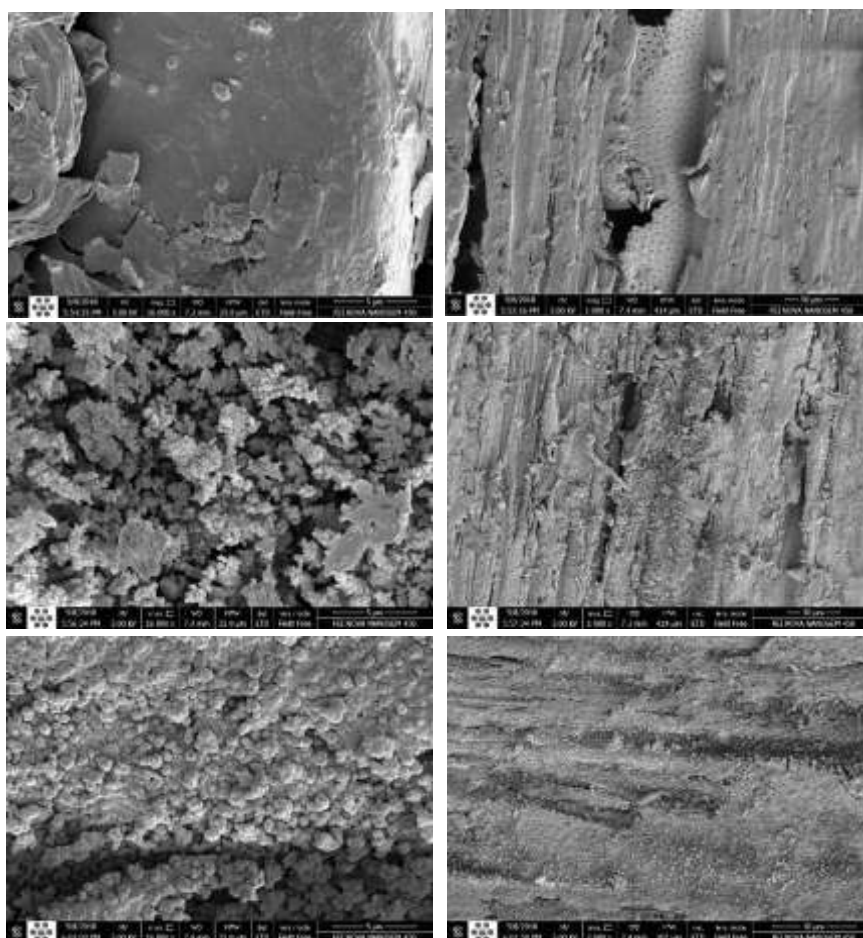
از دستگاه زبری سنج مدل SJ-201P برند Mitutoyo ساخت کشور ژاپن به منظور بررسی کیفیت زبری سطح نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدگی استفاده شد. فاکتورهای R_q (زبری مؤثر)، R_z (میانگین ارتفاع قله به دره) و R_a (میانگین زبری) توسط این دستگاه اندازه‌گیری شده است. زبری نسبی نمونه شاهد و تیمارهای پلاسما قبل و بعد از هوازدگی (R') بر اساس رابطه ۳ با یکدیگر مقایسه شدند. دو تکرار بر روی هر نمونه انجام شد.

$$R' = R_i / R_o \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن با R_i زبری قبل از هوازدگی و R_o زبری بعد از هوازدگی است.

طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی

طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی^۱ (ATR-FTIR) با استفاده از دستگاه ساخت شرکت Bruker (مدل Tensor 27) انجام شد. از سطح نمونه‌های چوبی لایه نازکی به ضخامت یک میلی‌متر در ابعاد ۱۰ در ۱۰ میلی‌متر جدا شده و برای شناسایی گروه‌های عاملی و پیوندهای موجود استفاده شد. جمع‌آوری طیف‌ها در طول موج cm^{-1} ۶۰۰ تا ۴۰۰۰ انجام شد. نمونه‌ها قبل از انجام آزمون‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.



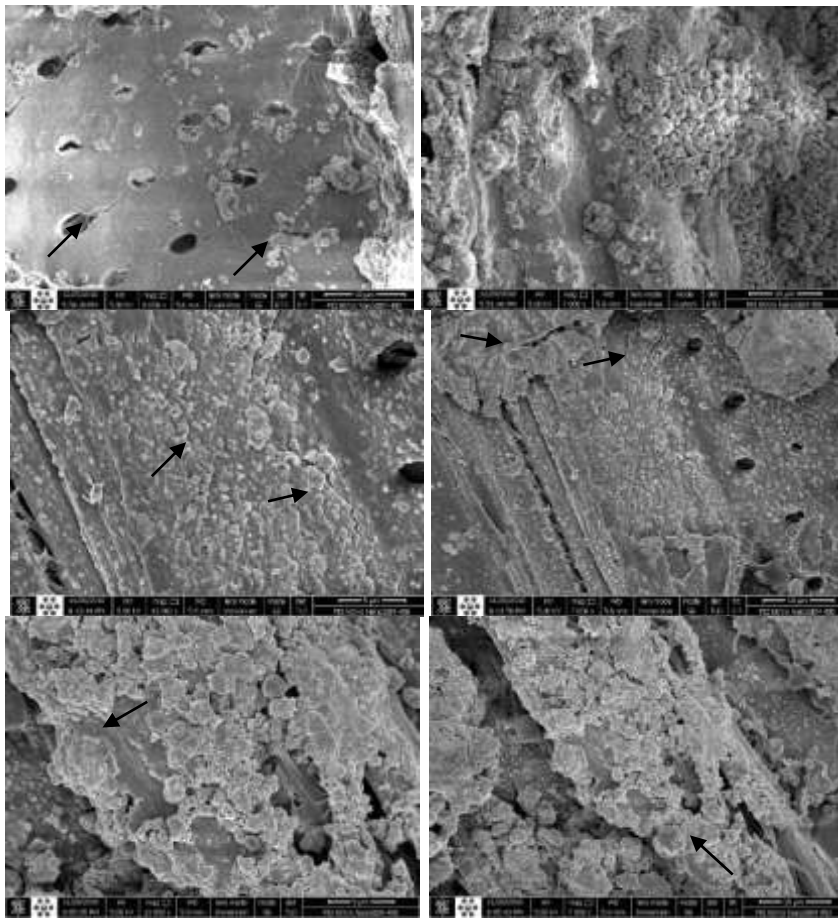
شکل ۳- تصاویر SEM از سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده

ردیف بالا) تیمار شاهد، ردیف میانی) $D_{1-1/2}$ ، f_0 ۱۰:۱۰، f_i ۲۳:۹۴، V_{18} و F_{18} ، ردیف پایین) $D_{1-1/2}$ ، f_0 ۱۰:۵۴، f_i ۲۷:۸۲، $V_{19/5}$ و $F_{22/5}$

چشمگیری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. از سویی شدت پیک موجود در محدوده 1730 cm^{-1} در نمونه‌هایی که سطح آنها در معرض پلاسمای بوده، افزایش یافته است. انعکاس طیف در این طول موج اغلب مربوط به گروه‌های کربونیل ($C=O$) موجود در همی سلولزها است (Lionetto *et al.*, 2012). پیک موجود در طول موج حدود 1505 تا 1510 cm^{-1} می‌باشد که مربوط به کشش $C=C$ در حلقه‌های آروماتیک لیگنین است (Tuong & Li, 2010) و در نمونه‌های تیمار شده شدت بیشتری داشت.

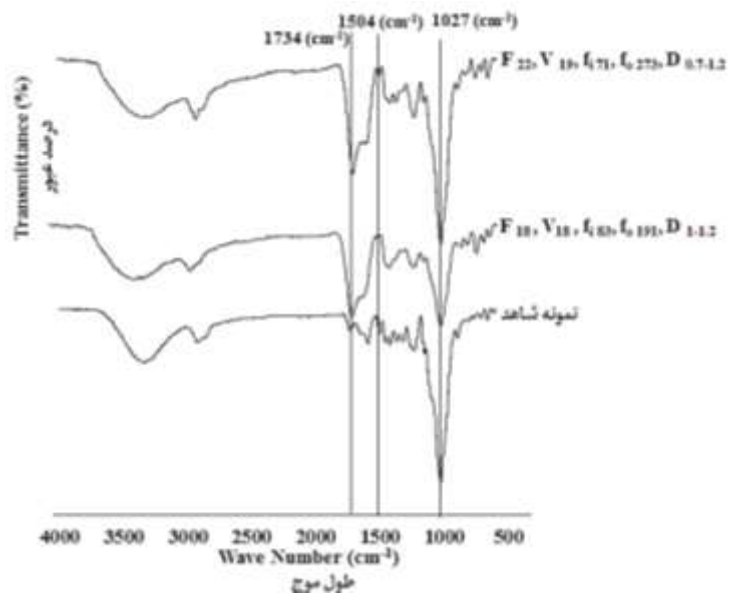
طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌ها قبل از هوازدگی طیف‌های مادون قرمز انعکاسی (ATR-FTIR) برای بررسی اثر تیمارهای انجام شده بر روی تغییرات شیمیایی سطح نمونه‌ها در شکل ۵ آمده است. به‌طورکلی تیمارهای انجام شده باعث محو پیک‌های موجود در تیمار شاهد نشده و یا پیک‌های جدیدی به وجود نیامدند.

شدت پیک 1027 cm^{-1} که مربوط به گروه‌های $C-O$ کششی در سلولز نوع ۱ و ۲ می‌باشد (Carrillo *et al.*, 2004) در تیمار $D_{1-1/2}$ ، f_0 ۱۰:۱۰، f_i ۲۳:۹۴، V_{18} و F_{18} به‌طور



شکل ۴- تصاویر SEM از سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده - بعد از هوازدگی

ردیف بالا) تیمار شاهد، ردیف میانی) $D_{1-1/2}$ ، $f_o_{10.10}$ ، $f_i_{23.94}$ و V_{18} و F_{18} ، ردیف پایین) $D_{1-1/2}$ ، $f_o_{10.54}$ ، $f_i_{27.82}$ و $V_{19/5}$ و $F_{22/5}$



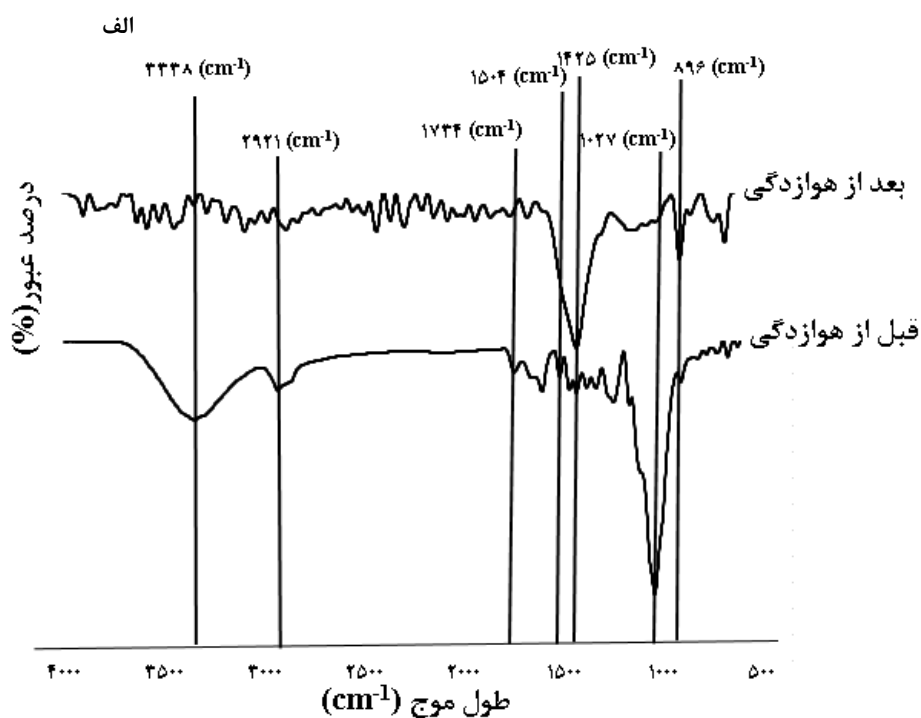
شکل ۵- طیف‌های FTIR-ATR نمونه‌های شاهد و تیمار شده

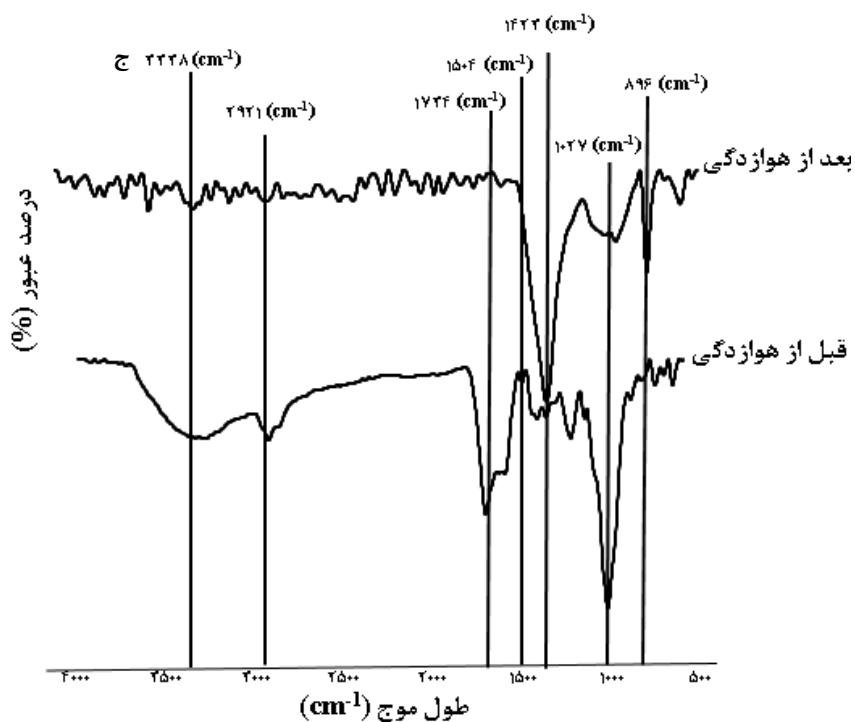
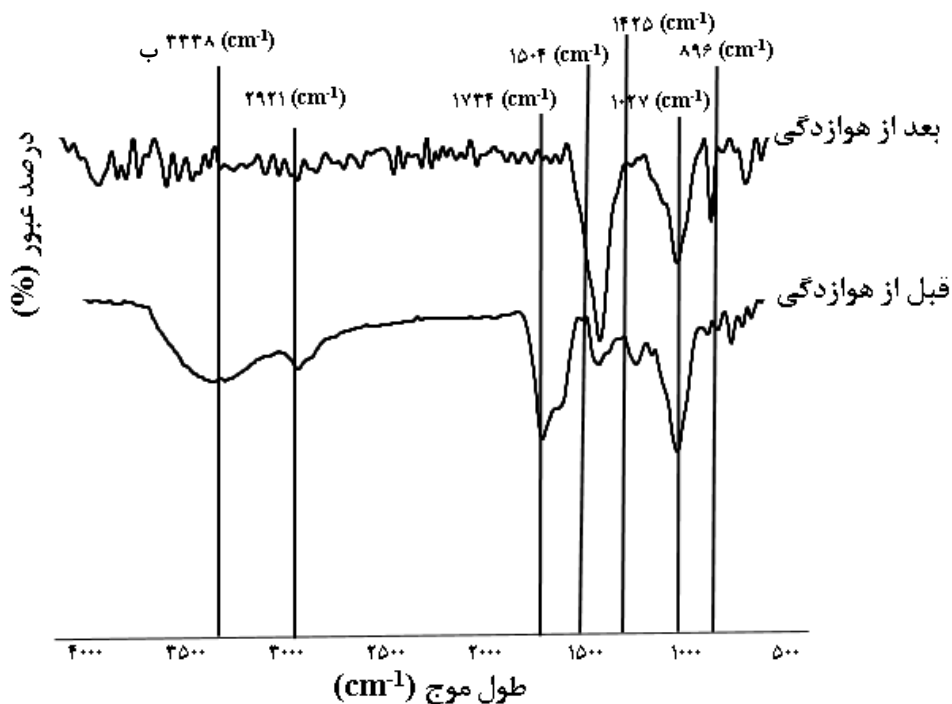
طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌ها بعد از هوازدگی طیف‌های مقایسه‌ای قبل و بعد از هوازدگی برای نمونه شاهد در شکل ۶- الف آمده است. به‌طورکلی هوازدگی باعث حذف برخی از پیک‌های موجود در حالت قبل از هوازدگی شده و در برخی دیگر نیز کاهش یا شدت انعکاس طیف IR دیده شد.

پیک‌های 3338 cm^{-1} و 2921 cm^{-1} که به ترتیب مربوط به کشش گروه‌های هیدروکسیل آزاد (OH) و پیوندهای هیدروژنی در فنل‌ها، اسیدها و الکل‌ها (Luna *et al.*, 2012) و گروه‌های C-H گروه‌های متیل و متیلن در سلولز (Pandey & Pitman, 2003) بودند به‌طورکلی حذف شدند. شدت پیک موجود در ناحیه 1734 cm^{-1} که مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل همی‌سلولزها بود پس از هوازدگی شدت بسیار کمی داشت. پیک موجود در 1504 cm^{-1} که مربوط به ساختار حلقه‌های آروماتیک لیگنین است به‌طورکلی پس از هوازدگی محو شده است.

پیک‌های 3338 cm^{-1} و 2921 cm^{-1} که به ترتیب مربوط به کشش گروه‌های هیدروکسیل آزاد (OH) و پیوندهای هیدروژنی در فنل‌ها، اسیدها و الکل‌ها (Luna *et al.*, 2012) و گروه‌های C-H گروه‌های متیل و متیلن در سلولز (Pandey & Pitman, 2003) بودند به‌طورکلی حذف شدند. شدت پیک موجود در ناحیه 1734 cm^{-1} که مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل همی‌سلولزها بود پس از هوازدگی شدت بسیار کمی داشت. پیک موجود در 1504 cm^{-1} که مربوط به ساختار حلقه‌های آروماتیک لیگنین است به‌طورکلی پس از هوازدگی محو شده است.

پیک ضعیف در محدوده 1425 cm^{-1} که مربوط به ارتعاش CH_2 در حلقه‌های آروماتیک یا کربوهیدرات‌های چوب است



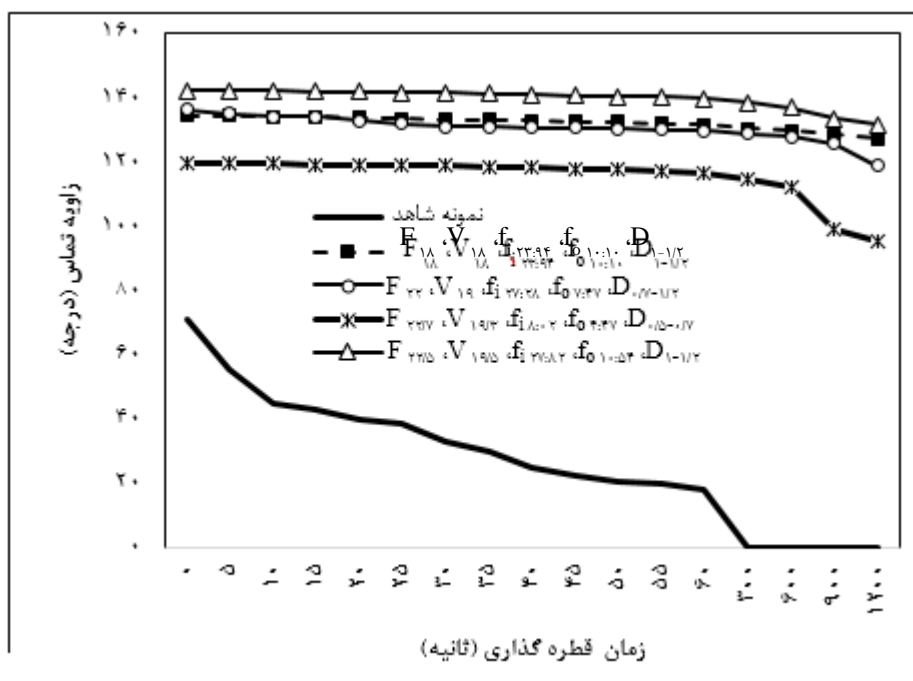


شکل ۶- طیف‌های FTIR-ATR: الف) نمونه شاهد، ب و ج) نمونه‌های تیمار شده قبل و بعد از هوازدگی

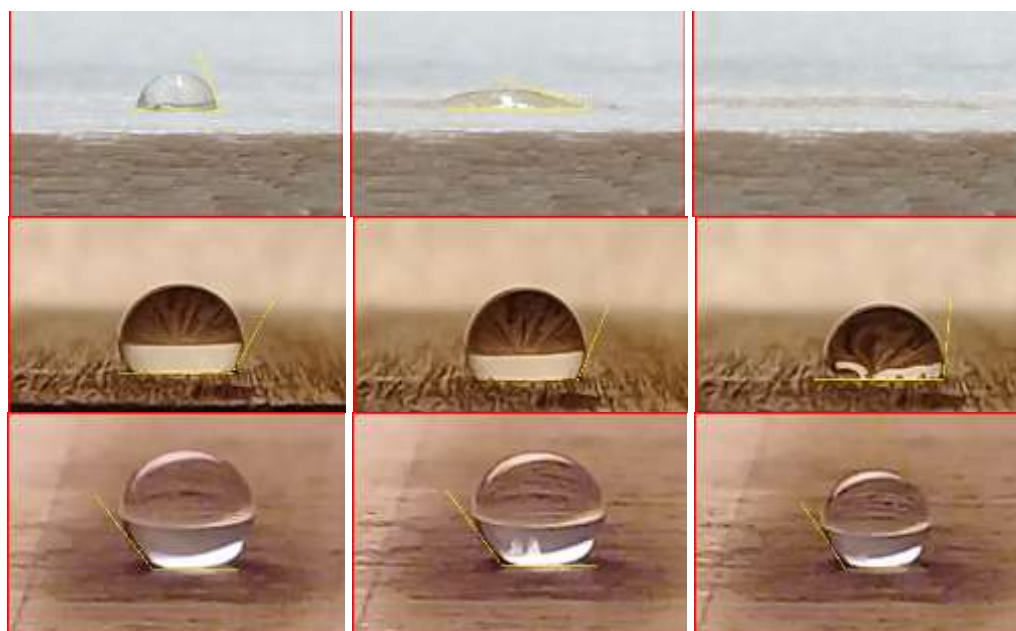
تماس قطره آب در نمونه‌های تیمار شده پس از ۱۲۰۰ ثانیه نیز تغییر چندانی نداشته و بسیار بزرگ‌تر از تیمار شاهد بود. این در حالی بود که در تیمار شاهد پس از ۳۰۰ ثانیه، قطره

زاویه تماس قطره آب سطح نمونه‌ها قبل از هوازدگی زاویه تماس قطره آب به صورت تابعی از زمان برای تیمارهای مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. زاویه

آب کاملاً در بافت چوب نفوذ کرد (شکل ۸). در بین نمونه‌های تیمار شده بیشترین مقدار زاویه تماس قطره آب در تیمار $F_{22/5}, V_{19/5}, f_{i27.82}, f_{o10.54}, D_{1-1/2}$ و کمترین آن نیز در تیمار $F_{22/7}, V_{19/3}, f_{i18.02}, f_{o4.47}, D_{.5-0.7}$ مشاهده شد.



شکل ۷- زاویه تماس قطره آب در نمونه‌های شاهد و تیمار شده به صورت تابعی از زمان



صفر ثانیه

۱۸۰ ثانیه

۱۲۰۰ ثانیه

شکل ۸- شکل قطره آب روی سطح نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده

ردیف بالا) تیمار شاهد، ردیف میانی) $F_{18}, V_{18}, f_{i23.94}, f_{o10.10}, D_{1-1/2}$ و $F_{22/5}, V_{19/5}, f_{i27.82}, f_{o7.47}, D_{.5-0.7}$ (ردیف پایین)

زاویه تماس قطره آب سطح نمونه‌ها بعد از هوازدگی

نیز کماکان دارای زاویه تماس بالایی بود، پس از هوازدگی در ثانیه پانزدهم از شروع آزمون اثری از قطره آب نبود و کاملاً در چوب نفوذ کرده بود.

زاویه تماس قطره آب نمونه‌ها پس از هوازدگی کاهش قابل توجه‌ای داشت (جدول ۲). تیمار $D_{1-1/2}$ ، $f_{i_{27.82}}$ ، $f_{o_{10.54}}$ و $V_{19/5}$ و $F_{22/5}$ که قبل از هوازدگی حتی پس از ۱۲۰۰ ثانیه

جدول ۲- زاویه تماس قطره آب نمونه‌های شاهد و تیمار شده بعد از هوازدگی

ردیف	تیمار	زاویه تماس قطره آب		
		ثانیه اول	بعد از ۵ ثانیه	بعد از ۱۵ ثانیه
۱	نمونه شاهد	۱۰۰/۸۲	۹۳/۵۴	-
۲	$F_{22/5}$ ، $V_{19/5}$ ، $f_{i_{27.82}}$ ، $f_{o_{10.54}}$ ، $D_{1-1/2}$	۱۲۱/۱۲	۸۷/۴۳	-
۳	F_{18} ، V_{18} ، $f_{i_{23.94}}$ ، $f_{o_{10.10}}$ ، $D_{1-1/2}$	۱۱۹/۴۴	۷۴/۲۹	-
۴	F_{22} ، V_{19} ، $f_{i_{27.28}}$ ، $f_{o_{7.47}}$ ، $D_{1-1/2}$	۱۰۸/۲۶	۸۱/۷۲	-
۵	$F_{22/7}$ ، $V_{19/3}$ ، $f_{i_{8.02}}$ ، $f_{o_{4.47}}$ ، $D_{1-0.5/7}$	۱۲۵/۲	۸۹/۴۹	۴۵/۵۲

زبری سطح نمونه‌ها قبل از هوازدگی

شاهد دارای سطح زبرتری بودند. افزایش زبری سطح نمونه‌ها در تیمار شده در تصاویر میکروسکوپی نیز به خوبی قابل مشاهده است که با زگیلی شدن سطح همراه بود.

مقادیر مربوط به پارامترهای زبری سطح چوب در جدول ۳ نشان داده شده است. نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه

جدول ۳- پارامترهای زبری سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده

ردیف	کد تیمار	R_a'	R_q'	R_z'
		(μm)		
۱	نمونه شاهد	۲/۲۵±۰/۳۴	۳±۰/۳۴	۱۳/۰۲±۲/۲۱
۲	$F_{22/5}$ ، $V_{19/5}$ ، $f_{i_{27.82}}$ ، $f_{o_{10.54}}$ ، $D_{1-1/2}$	۸/۰۵±۱/۴۳	۱۰/۷۶±۲/۱۴	۵۹/۴۷±۶/۳۱
۳	F_{18} ، V_{18} ، $f_{i_{23.94}}$ ، $f_{o_{10.10}}$ ، $D_{1-1/2}$	۹/۷۷±۲/۲۱	۱۳/۴۲±۲/۸۱	۷۷/۴۰±۷/۷۴
۴	F_{22} ، V_{19} ، $f_{i_{27.28}}$ ، $f_{o_{7.47}}$ ، $D_{1-1/2}$	۷/۹۴±۱/۸۳	۱۰/۹۶±۱/۸۶	۴۷/۲۸±۳/۸۸
۵	$F_{22/7}$ ، $V_{19/3}$ ، $f_{i_{8.02}}$ ، $f_{o_{4.47}}$ ، $D_{1-0.5/7}$	۴/۳۷±۰/۷۶	۵/۹±۱/۱۰	۳۸/۲۳±۴/۵۳

زبری سطح نمونه‌ها بعد از هوازدگی

از هوازدگی آمده است. مقادیر زبری نسبت به قبل از هوازدگی افزایش داشته است. اما بیشترین درصد افزایش مربوط به نمونه شاهد است.

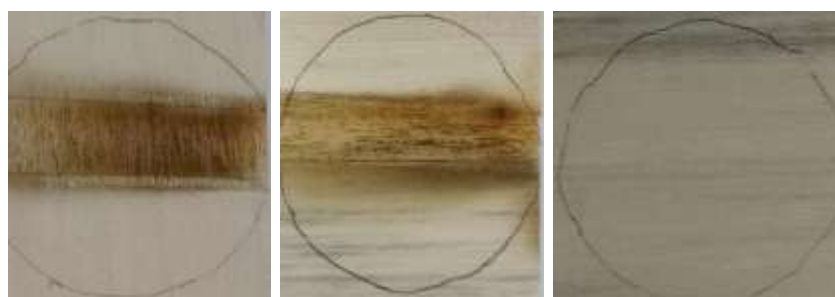
در جدول ۴ مقادیر میانگین پارامترهای زبری سطح نمونه‌ها بعد از هوازدگی و درصد تغییرات آنها نسبت به قبل

جدول ۴- پارامترهای زبری سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده - بعد از هوازدگی

ردیف	کد نمونه	R_a^* (μm)	ΔR_a^*	R_q^* (μm)	ΔR_q^*	R_z^* (μm)	ΔR_z^*
۱	نمونه شاهد	$4/9 \pm 0/78$	$117/87$	$10/22 \pm 1/66$	$240/67$	$33/01 \pm 6/31$	$153/53$
۲	$f_{i_{27:82}}, f_{o_{10:54}}, D_{1-1/2}$ $F_{22/5}, V_{19/5}$	$12/95 \pm 1/34$	$60/87$	$14/62 \pm 3/42$	$35/87$	$95/98 \pm 14/23$	$61/39$
۳	$f_{i_{23:94}}, f_{o_{10:10}}, D_{1-1/2}$ F_{18}, V_{18}	$12 \pm 2/12$	$22/82$	$19/27 \pm 2/79$	$43/59$	$102/99 \pm 12/59$	$32/95$
۴	$f_{i_{27:28}}, f_{o_{7:47}}, D_{1-1-7/2}$ F_{22}, V_{19}	$10/37 \pm 2/84$	$30/60$	$11/79 \pm 0/80$	$7/57$	$55/8 \pm 9/48$	$14/80$
۵	$f_{i_{8:2}}, f_{o_{4:47}}, D_{1-0-5/7}$ $F_{22/7}, V_{19/3}$	$6/11 \pm 1/34$	$39/82$	$8/47 \pm 2/10$	$43/56$	$52/12 \pm 7/23$	$36/33$

تغییرات رنگ سطح نمونه‌ها قبل از هوازدگی به صورت ظاهری منطقه تیمار شده در سطح نمونه‌ها نسبت به تیمار شاهد تیره‌تر بود و رنگ متمایل به قهوه‌ای داشت (شکل ۹). تغییرات رنگ بر روی سطح نمونه‌ها یکنواخت نبود. البته قسمتی از نمونه‌ها که در آن آرک‌های الکتریکی شدیدی شکل گرفته بودند رنگ تیره‌تری داشت. بیشترین و کمترین تغییرات رنگ نسبت به نمونه شاهد به ترتیب در تیمارهای $f_{i_{27:82}}, f_{o_{10:54}}, D_{1-1/2}, F_{22/5}, V_{19/5}$ و $f_{i_{8:2}}, f_{o_{4:47}}, D_{1-0-5/7}, F_{22/7}, V_{19/3}$ دیده شد (جدول ۵). محور a^* معرف رنگ‌های سبز تا قرمز است. اعداد منفی

مربوط به رنگ سبز بوده و اعداد مثبت معرف رنگ قرمز است. تغییرات مثبت a^* نسبت به تیمار شاهد نشان‌دهنده قرمزشدگی سطح نمونه‌ها پس از تیمار پلاسماست. محور b^* معرف رنگ‌های آبی تا زرد است. رنگ آبی در جهت منفی بوده و اعداد مثبت نیز معرف رنگ زرد است. مقادیر Δb^* مثبت در نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای واقع نشان‌دهنده تمایل آنها به زردی پس از تیمار است. پارامتر L^* در مقدار صفر نشان‌دهنده رنگ سیاه مطلق است و مقدار ۱۰۰ آن نیز معرف رنگ سفید مطلق است. مقادیر منفی ΔL^* نشان‌دهنده تیره‌تر شده سطح نمونه‌ها نسبت به شاهد پس از تیمار پلاسماست.



شکل ۹- تغییرات رنگ در سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده

از راست به چپ: شاهد، $f_{i_{27:82}}, f_{o_{10:54}}, D_{1-1/2}, F_{18}, V_{18}, f_{i_{23:94}}, f_{o_{10:10}}, D_{1-1/2}, F_{22/5}$ و $V_{19/5}$

جدول ۵- اختلاف پارامترهای رنگ در نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه شاهد

ΔE^*	تغییرات نسبت به نمونه شاهد			کد تیمار	ردیف
	ΔL^*	Δb^*	Δa^*		
۲۳۱/۴±۳۲/۲۱	-۵۴/۵۶±۷/۸۴	۷۰/۹۱±۱۱/۵۲	۲۳۱/۸۴±۲۳/۷۸	$F_{۲۲/۵}, V_{۱۹/۵}, f_{i ۲۷:۸۲}, f_{o ۱۰:۵۴}, D_{۱-۱/۲}$	۱
۱۶۹/۵۸±۱۴/۵۶	-۳۶/۶۲±۴/۴۲	۵۴/۵۷±۵/۹۷	۱۵۶/۳۲±۱۹/۴۸	$F_{۱۸}, V_{۱۸}, f_{i ۲۳:۹۴}, f_{o ۱۰:۱۰}, D_{۱-۱/۲}$	۲
۱۴۶/۴۳±۱۱/۵۹	-۲۹/۶۹±۵/۶۱	۴۷/۶۰±۸/۹۴	۱۳۴/۸۴±۲۱/۳۷	$F_{۲۲}, V_{۱۹}, f_{i ۲۷:۲۸}, f_{o ۷:۴۷}, D_{۱-۱/۲}$	۳
۸۱/۶۶±۵/۹۱	-۱۵/۷۲±۲/۴۳	۲۱/۸۶±۴/۲۱	۷۷/۰۹±۱۵/۱۰	$F_{۲۲/۷}, V_{۱۹/۳}, f_{i ۸:۰۲}, f_{o ۴:۴۷}, D_{۱-۰:۵/۷}$	۴

هوازدگی منفی بود که نشان‌دهنده بروز طیف‌های آبی پس از هوازدگی در سطح چوب است. شدت تغییرات Δb^* در نمونه شاهد بسیار کمتر از نمونه‌های تیمار شده بود. مقدار ΔL^* نیز برای تیمار شاهد منفی بود که به معنای تیره‌تر شدن سطح این نمونه‌ها پس از هوازدگی است. اما در نمونه‌های تیمار شده مقادیر ΔL^* منفی بود که نشان‌دهنده روشنی سطح آنها پس از هوازدگی است.

تغییرات رنگ سطح نمونه‌ها بعد از هوازدگی هوازدگی تسریع شده موجب تغییر رنگ سطح نمونه‌ها شد (شکل ۱۰). مقادیر Δa^* که معرف قرمزی سطح است در نمونه‌های تیمار شده منفی بود که نشان‌دهنده کاهش قرمزی سطح و تمایل آن به طیف‌های سبز بود (جدول ۶). در نمونه شاهد مقادیر Δa^* مثبت بود که نشان‌دهنده تمایل به طیف‌های قرمز پس از هوازدگی است. مقادیر Δb^* همه نمونه‌ها پس از



شکل ۱۰- تغییرات رنگ در سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده - بعد از هوازدگی

از راست به چپ: شاهد، $D_{۱-۱/۲}, f_{o ۱۰:۱۰}, f_{i ۲۳:۹۴}, V_{۱۸}, F_{۱۸}$ ، $D_{۱-۱/۲}, f_{o ۱۰:۵۴}, f_{i ۲۷:۸۲}, V_{۱۹/۵}$ و $F_{۲۲/۵}$

جدول ۶- تغییرات پارامترهای رنگ نمونه‌های شاهد و تیمار شده نسبت به حالت قبل از هوازدگی

ΔE^*	نسبت به حالت قبل از هوازدگی			کد تیمار	ردیف
	ΔL^*	Δb^*	Δa^*		
۶۳/۷۸	-۱۰/۰۱±۱/۶۴	-۶/۳۴±۱/۰۷	۶۲/۷۷±۷/۱۳	نمونه شاهد	۱
۸۵/۵۸	۴۲/۶۲±۳/۰۸	-۵۱/۹۳±۲/۴۴	-۵۲/۹۳±۶/۸۷	$F_{۲۲/۵}, V_{۱۹/۵}, f_{i ۲۷:۸۲}, f_{o ۱۰:۵۴}, D_{۱-۱/۲}$	۲
۶۱/۴۰	۱۶/۰۴±۳/۴۱	-۴۱/۹۱±۶/۱۲	-۴۱/۹۰±۷/۳۴	$F_{۱۸}, V_{۱۸}, f_{i ۲۳:۹۴}, f_{o ۱۰:۱۰}, D_{۱-۱/۲}$	۳
۶۳/۹۸	۸/۲۹±۱/۸۱	-۴۷/۰۲±۵/۳۹	-۴۲/۵۸±۳/۴۱	$F_{۲۲}, V_{۱۹}, f_{i ۲۷:۲۸}, f_{o ۷:۴۷}, D_{۱-۱/۲}$	۴
۵۲/۸۳	۲/۴۵±۰/۳۴	-۴۰/۳۳±۳/۷۴	-۳۴/۱۰±۵/۱۰	$F_{۲۲/۷}, V_{۱۹/۳}, f_{i ۸:۰۲}, f_{o ۴:۴۷}, D_{۱-۰:۵/۷}$	۵

بحث

سطح نمونه‌های تیمار شده با پوششی زیر اندود شده و یا در اصطلاح حکاکی شده بودند. از این رو به نظر می‌رسد با افزایش میزان فرکانس و میزان جریان ورودی گاز و همچنین کاهش فاصله بین الکترودها و میزان جریان خروجی گاز، پوشیدگی حفره‌ها و ناهمواری‌های موجود در سطح چوب بهتر انجام شده است. در تحقیقات دیگر گزارش شده است که تیمار پلاسمای غیرحرارتی در فشار پایین، زبری سطح را با تشکیل لایه زگیلی افزایش می‌دهد (Denes & Young, 1999) و همین موضوع باعث افزایش آبگریزی سطح چوب می‌شود (de Cademartori *et al.*, 2017; Moghaddam *et al.*, 2016). علت ناصافی سطح نمونه شاهد پس از هوازدهی می‌تواند به دلیل جدا شدن تکه‌های دیواره‌های سلولی باشد که بر اثر تخریب لیگنین جدا شده‌اند (Zille *et al.*, 2015; Lionetto *et al.*, 2012). هوازدهی یک پدیده سطحی بوده و عامل اصلی اثرگذار بر روی آن، تخریب نوری لیگنین است. اما روابط بین آب و چوب نیز به صورت خیس و خشک شدن‌های متوالی، نقش بسزایی در تشدید و پیشرفت آن دارد (Reinprecht, 2016). این حالت باعث بروز ترک‌های ریز و بزرگ در سطح چوب شده و ریخت‌شناسی سطح را تغییر می‌دهد. البته لایه زگیلی به وجود آمده بر اثر تیمار پلاسمای نیز تا حد زیادی یکپارچگی خود را پس از هوازدهی از دست داده بود.

علت کاهش شدت پیک مربوط به گروه‌های C-O کششی در سلولز نوع ۱ و ۲ در نمونه‌های تیمار شده قبل از هوازدهی، نشان‌دهنده تجزیه نسبی سلولز سطح چوب در این تیمار است. تشکیل کروموفورهای کربونیل بر اثر تغییر در ساختار لیگنین نیز می‌تواند موجب افزایش پیک مربوط به گروه‌های کربونیل (C=O) موجود در همی‌سلولزها شود (Mirshokraie *et al.*, 2014). در مطالعه دیگری بر روی پلاسمای سطح چوب با گاز اکسیژن به منظور افزایش نپذیری، شدت پیک موجود در این ناحیه افزایش یافت (Aydin & Demirkir, 2010). البته افزایش شدت این پیک گاهی به اکسایش لیگنین و تشکیل گروه‌های جدید کربوکسیل نیز ارتباط داده شده است

(Zille *et al.*, 2015). آنچه از بررسی طیف‌ها قابل استنباط است، تیمار پلاسمای موجب افزایش شدت پیک‌های مربوط به لیگنین شده است.

دلیل شدت بسیار کم پیک مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل همی‌سلولزها پس از هوازدهی می‌تواند به علت استیل‌زدایی همی‌سلولزها باشد. Xing و همکاران (۲۰۱۵) نیز در بررسی اثر هوازدهی تسریع شده بر روی تغییرات سطح چوب لاریکس به نتایج مشابهی دست یافتند. کاهش شدت این پیک بر اثر هوازدهی طولانی‌مدت سطح چوب و در نتیجه تخریب همی‌سلولزها توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Huang *et al.*, 2013). لیگنین ضعیف‌ترین پلیمر چوب در برابر عوامل جوی بوده و خیلی سریع تحت تأثیر تخریب نوری قرار می‌گیرد (Reinprecht, 2016) که می‌تواند علت محو شدن پیک مربوط به ساختار حلقه‌های آروماتیک لیگنین باشد. حذف پیک مربوط به C-O کششی در سلولز نوع ۱ و ۲ (Schwanninger *et al.*, 2004) پس از هوازدهی نشان‌دهنده شدت تغییرات در سلولز و همی‌سلولز در طی هوازدهی چوب است (Xing *et al.*, 2015). علت حضور پیک مربوط به C-O کششی در نمونه‌های تیمار شده پس از هوازدهی برخلاف تیمار شاهد که پس از هوازدهی کاملاً حذف شده بود، می‌تواند تا حدودی حفاظت از کربوهیدرات‌های سطح چوب توسط لایه زگیلی ایجاد شده را توسط پلاسمای تأیید کند.

البته هر چه میزان جریان ورودی و خروجی گاز و فاصله بین الکترودها بیشتر بود؛ زاویه تماس قطره آب بزرگ‌تری به دست آمد. Podgorski و همکاران (۲۰۰۲) در مطالعه‌ای بر روی رفتار آب‌گریزی سطح چوب‌های تیمار شده با پلاسمای همراه با انواع مونومرها و گازها گزارش کردند که با استفاده از این تکنیک امکان افزایش زاویه تماس سطح نمونه‌های چوب کاج جنگلی تا ۱۳۷ درجه وجود دارد، درحالی‌که در نمونه شاهد میانگین زاویه تماس ۱۰۰ درجه بود. آنان گزارش کردند که با افزایش جریان گاز، میزان تزریق مونومر به محفظه پلاسمای، فاصله بین الکترودها و زمان تیمار، امکان دستیابی به زاویه تماس بزرگ‌تر وجود دارد (Podgorski *et al.*, 2002).

تغییرات رنگ دارند. مطالعات کمی در مورد اثر تیمار پلاسما بر روی رنگ چوب انجام شده است اما به طور کلی استفاده از تیمارهای لایه نشانی با توجه به ماهیت مونومر استفاده شده باعث تغییرات رنگ شدید می‌شود، درحالی‌که استفاده از گازهای اکسیدکننده مانند اکسیژن که اغلب برای لایه برداری و حکاکی سطح استفاده می‌شود تأثیر چندانی بر روی رنگ سطح ندارد (Aydin & Demirkir, 2010). تخریب نوری لیگنین و شسته شدن قطعات تجزیه شده آن باعث روشن تر شدن چوب‌های تیره و تیره شدن چوب‌های روشن می‌شود (Reinprecht, 2016).

نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از فناوری‌های جدید در صنایع مختلف باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها می‌شود. از سویی فناوری‌های جدید از نظر محیط‌زیستی نیز دارای اهمیت بوده و اغلب دوست‌دار محیط‌زیست هستند. تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر برای استفاده از فناوری پلاسما در صنایع چوب با اهداف مختلف انجام شده و در حال انجام است. استفاده از پلاسما گلاید گاز متان به‌طور اولیه و قبل از هوازدگی باعث آب‌گریزی قابل‌توجه سطح چوب صنوبر شد. ایجاد لایه زگیلی بر روی سطح چوب و احتمالاً حکاکی (تغییر توپوگرافی) سطح از دلایل این موضوع می‌تواند باشد. تیمارهای انجام شده باعث تیره شدن سطح نمونه‌ها شد که پس از هوازدگی حالت تیره‌ای رنگ داشتند. همچنین قابلیت آب‌گریزی سطح نمونه‌های تیمار شده نیز پس از هوازدگی کاملاً از دست رفت. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد، بر اثر هوازدگی ترک‌های میکروسکوپی زیادی بر روی سطح چوب ایجاد می‌شود که باعث نفوذ سریع آب به داخل بافت چوب می‌گردد. اگرچه تیمارهای انجام شده در این تحقیق باعث افزایش زبری سطح شد اما نتایج استفاده نشان داد که در اثر هوازدگی نمونه‌های شاهد تیمار نشده میزان افزایش زبری بیشتری نسبت به نمونه‌های تیمار شده داشتند. البته تیمار سطح چوب با پلاسما گلاید دارای قابلیت بالایی برای ایجاد

یافته‌های آنان با نتایج این تحقیق با استفاده از گاز متان مطابقت داشت. به‌نحوی‌که پس از هوازدگی، قدرت آب‌گریزی سطوح تیمار شده به شدت کاهش پیدا کرد. ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در تصاویر الکترونی نیز قابل رؤیت بود، همچنین تجزیه لیگنین سطح چوب می‌تواند افزایش سرعت نفوذ قطره آب در داخل بافت چوب را نشان دهد.

در مطالعه‌ای برای لایه نشانی ذرات اکسید آلومینیوم بر روی چوب پلاستیک از فناوری پلاسما استفاده کرده و بیان کردند که تیمار پلاسما فشار پایین با گاز آرگون هرچند باعث تثبیت نانو ذرات بر روی سطح کامپوزیت می‌شود اما حکاکی سطح توسط پلاسما باعث افزایش زبری می‌گردد (de Cademartori et al., 2018). در مطالعه دیگری افزایش آب‌گریزی سطح چوب نوئل و سدر برزیلی با استفاده از پلاسما تخلیه دی‌الکتریک با گاز پرفلوروپروپان بررسی شد (de Cademartori et al., 2017). محققان برای افزایش زبری سطح و لایه نشانی بهینه، گاز اکتافلوروپروپان از پیش تیمار با گاز اکسیژن در محفظه پلاسما استفاده کردند. نتایج نشان داد اگرچه زبری سطح با حکاکی سطح توسط پلاسما با گاز اکسیژن افزایش می‌یابد اما ایجاد اتصالات قطبی بر اثر مولکول‌های اکسیژن آب‌گریزی سطح را کاهش می‌دهد. این در حالی بود که لایه نشانی گاز اکتافلوروپروپان نه تنها زبری را افزایش داد بلکه باعث افزایش آب‌گریزی سطح نیز شد. در واقع افزایش زبری سطح تنها دلیل کاهش آب‌دوستی سطح چوب نمی‌باشد و باید در انتخاب پارامترهای دخیل در فرایند پلاسما نیز توجه شود. البته تغییر در مورفولوژی سطح نمونه‌ها بر اثر تخریب نوری لیگنین و همچنین تأثیر روابط بین آب و چوب (ایجاد ترک‌ها) می‌تواند از دلایل افزایش زبری بعد از هوازدگی باشد (Feist, 1990).

تیره شدن سطح چوب تا حد زیادی به دلیل رسوب لایه‌ای از مواد جدید به وجود آمده از گاز در محفظه پلاسما بود. اما پالس‌های ایجاد شده بین دو الکتروود نیز می‌تواند تا حدی باعث سوختگی و تیرگی رنگ سطح چوب شود. بنابراین به نظر می‌رسد که هرچقدر میزان جریان ورودی و خروجی گاز و فاصله بین الکتروودها بیشتر باشد، تأثیر زیادتری روی

- Attachment of Al₂O₃ Nanoparticles to Wood-Plastic Composites. *J. of Wood Chemistry and Technology*. 38: 2. 71-83.
- De Cademartori, P.H.G., Stafford, L., Blanchet, P., Magalhães, W.L.E. and de Muniz, G.I.B. 2017. Enhancing the water repellency of wood surfaces by atmospheric pressure cold plasma deposition of fluorocarbon film. *RSC Advances*. 7: 46. 29159-29169.
- DemirKir, C., Aydin, I., Colak, S. and Çolakoğlu, G. 2014. Effects of plasma treatment and sanding process on surface roughness of wood veneers. *Turkish J. of Agriculture and Forestry*. 38: 5. 663-667.
- Denes, A.R. and Young, R.A. 1999. Reduction of weathering degradation of wood through plasma-polymer coating. *Holzforschung*. 53: 6. 632-640.
- Feist, W.C. 1990. Outdoor wood weathering and protection. *Outdoor wood weathering and protection*. 225: 263-298.
- Freeman, M.H., Shupe, T.F., Vlosky, R.P. and Barnes, H.M. 2003. Past, present, and future of the wood preservation industry. *Forest Products*. J. 53: 10. 8-15.
- Gascón-Garrido, P., Mainusch, N., Militz, H., Viöl, W. and Mai, C. 2016. Effects of copper-plasma deposition on weathering properties of wood surfaces. *Applied Surface Science*. 366: 112-119.
- Gascón-Garrido, P., Thévenon, M.F., Mainusch, N., Militz, H., Viöl, W. and Mai, C. 2017. Siloxane-treated and copper-plasma-coated wood: Resistance to the blue stain fungus *Aureobasidium pullulans* and the termite *Reticulitermes flavipes*. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 120: 84-90.
- Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y. and Krause, C. 2013. Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering. *Applied Surface Science*. 264: 117-127.
- Kim, M.M., Kim, H.S. and Lim, J.Y. 2013. A study on the effect of plasma treatment for waste wood biocomposites. *J. of Nanomaterials*. 2013: 1-6.
- Lionetto F., Del Sole R., Cannoletta D., Vasapollo G. and Maffezzoli, A. 2012. Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity. *Materials*. 5: 10. 1910-1922.
- Luna, M. L., Murace, M. A., Robledo, G. L. and Saparrat, M. C. 2012. Characterization of *Schinopsis haenkeana* wood decayed by *Phellinus chaquensis* (Basidiomycota, Hymenochaetales). *IAWA J*. 33:1.91-104.
- Mirshokraie S.A., Larie J., Mostaghni F. and Abdulkhani, A., 2014. Analysis of photodegraded lignin and lignin model compounds by ATR-FTIR
- سطوح آب‌گریز روی چوب است اما این لایه دوام چندانی نداشته و بر اثر هوازدگی اثر خود را از دست می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از گازهای مختلف و انواع پلاسما برای بررسی دقیق‌تر این روش و امکان تجاری‌سازی آن استفاده شود. بررسی قابلیت تثبیت انواع جاذب‌های نور خورشید و ایجاد سطوح بادوام در برابر پارامترهای هوازدگی با استفاده از پلاسمای گازهای مختلف می‌تواند دورنمای نویدبخشی را برای ایجاد سطوح آب‌گریز و حتی ابر آب‌گریز داشته باشد.

منابع مورد استفاده

- Acda, M.N., Devera, E.E., Cabangon, R.J. and Ramos, H.J. 2012. Effects of plasma modification on adhesion properties of wood. *International J. of Adhesion and Adhesives*. 32: 70-75.
- Altgen, D., Bellmann, M., Wascher, R., Viöl, W. and Mai, C. 2015. Enhancing mechanical properties of particleboards using plasma treated wood particles. *European J. of wood and wood products*. 73: 2. 219-223.
- Avramidis, G., Klarhöfer, L., Maus-Friedrichs, W., Militz, H. and Viöl, W. 2012. Influence of air plasma treatment at atmospheric pressure on wood extractives. *Polymer degradation and stability*. 97: 3. 469-471.
- Aydin, I. and Demirkir, C. 2010. Activation of spruce wood surfaces by plasma treatment after long terms of natural surface inactivation. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 30: 5. 697-706.
- Becker, K. H. and Belkind, A. 2003. Introduction to plasmas. *Vac Technol Coat* 5: 31-36.
- BS EN 927-6:2006 Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.
- Carrillo, F., Colom, X., Sunol, J.J. and Saurina, J. 2004. Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres. *European Polymer J*. 40: 9. 2229-2234.
- Clausen, C.A., Kartal, S.N., Arango, R.A. and Green, F., 2011. The role of particle size of particulate nano-zinc oxide wood preservatives on termite mortality and leach resistance. *Nanoscale research letters*. 6: 1. 427.
- De Cademartori, P.H.G., S. Junior, L.R., Blanchet, P., Magalhães, W.L. and de Muniz, G.I. B. 2018. The Use of Low-pressure Plasma on Enhancing the

- international. 83: 8. 399-403.
- Sarmadi, M. and Denes, F. 1996. Surface modification of polymers under cold plasma conditions. *Tappi J.* 79: 8. 189-204.
- Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., Pereira, H. and Hinterstoisser, B. 2004. Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. *Vibrational Spectroscopy.* 36: 1. 23-40.
- Tuong, V. M. and Li, J. 2010. Effect of heat treatment on the change in color. *BioResources.* 5: 2. 1257-1267.
- Uehara, T. and Sakata, I. 1990. Effect of corona discharge treatment on cellulose prepared from beech wood. *J. of applied polymer science.* 4: 7-8. 1695-1706.
- Vander Wielen, L. C., Östenson, M., Gatenholm, P. and Ragauskas, A. J. 2006. Surface modification of cellulosic fibers using dielectric-barrier discharge. *Carbohydrate polymers.* 65: 2. 179-184.
- Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Hauswald, E., Militz, H. and Viöl, W. 2009. Sanding vs. plasma treatment of aged wood: A comparison with respect to surface energy. *International J. of Adhesion and Adhesives,* 29: 1. 1. 18-22.
- Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Militz, H. and Viöl, W. 2008. Plasma treatment of heat treated beech wood—investigation on surface free energy. *Holzforschung,* 62: 4. 472-474.
- Xing, D., Wang, S. and Li, J. 2015. Effect of artificial weathering on the properties of industrial-scale thermally modified wood. *BioResources.* 10: 4. 8238-8252.
- Zhang, J., Kamdem, D. P. and Temiz, A. 2009. Weathering of copper–amine treated wood. *Applied Surface Science.* 256: 3. 842-846.
- Zille, A., Oliveira, F. R. and Souto, A. P. 2015. Plasma Treatment in Textile Industry. *Plasma processes and Polymers.* 2: 12. 98–131.
- spectroscopy. *Iranian J. of Wood and Paper Science Research.* 29: 3. 343-353.
- Moghaddam, M.S., Heydari, G., Tuominen, M., Fielden, M., Haapanen, J., Mäkelä, J.M., Wålinder, M.E., Claesson, P.M. and Swerin, A., 2016. Hydrophobisation of wood surfaces by combining liquid flame spray (LFS) and plasma treatment: dynamic wetting properties. *Holzforschung.* 70: 6. 527-537.
- Owen, N. L. and Thomas, D. W. 1989. Infrared studies of “hard” and “soft” woods. *Applied spectroscopy,* 43: 3. 451-455.
- Pabeliña, K. G., Lumban, C. O. and Ramos, H. J., 2012. Plasma impregnation of wood with fire retardants. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 272: 1. 365-369.
- Pandey, K. K. and Pitman, A. J. 2003. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International biodeterioration & biodegradation.* 52: 3. 151-160.
- Poaty, B., Riedl, B., Blanchet, P., Blanchard, V. and Stafford, L. 2013. Improved water repellency of black spruce wood surfaces after treatment in carbon tetrafluoride plasmas. *Wood science and technology.* 47: 2. 411-422.
- Podgorski, L., Bousta, C., Schambourg, F., Maguin, J. and Chevet, B., 2002. Solid softwood coated with plasma-polymer for water repellence. *Surface and Coatings Technology,* 155: 1. 11-15.
- Rehn, P., Wolkenhauer, A., Bente, M., Förster, S. and Viöl, W. 2003. Wood surface modification in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure. *Surface and Coatings Technology.* 174: 515-518.
- Reinprecht, L. 2016. *Wood deterioration, protection and maintenance.* John Wiley & Sons. 376.
- Roux M. L. and Podgorski L., 2000. The advantages of having in the future a European accelerated weathering test for wood finishes. *Surface coatings*

The effect of glide plasma with methane gas on the hydrophobicity of poplar wood surface

A. Topa¹, A. Ghorbanzadeh² and D. Efhamisi^{3*}

1-PhD. student in wood science and technology, University of Tehran, I. R. Iran.

2-Associate Professor, Department of physics, University of Tehran, Iran.

3*-Corresponding Author, Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran,

Email: efhami@ut.ac.ir

Received: Feb., 2021

Accepted: May, 2021

Abstract

The plasma has different effects on the surface wettability of wood, depending on the treatment conditions and the type of gas used. The hydrocarbon gases usually destroy hydrophilic groups on the surface of wood and cause hydrophobicity by creating microscopic rough structures. In this study, glide plasma treatment with methane was used to hydrophilize the surface of the wood and create weathering resistance. The poplar wood (*Populus deltoides*) were exposed to glide plasma under various laboratory conditions such as time of exposure, voltage, frequency, distance between electrodes as well as flow of inlet gas and outlet gas with methane inside a reactor. Then the surface properties of wood were studied using scanning electron microscope (SEM), measurement of water drop contact angle, ATR-FTIR spectroscopy, roughness survey, and colorimetry. The specimens were then subjected to the accelerated weathering using the Gardner weathering wheel and their properties were checked again. The SEM images showed that the plasma creates a warty layer on the surface of the wood which could be due to the deposition of new materials or the physical effects of plasma (surface etching). The plasma treatment significantly increased the contact angle of the water droplet on the surface of the treated samples. The treated samples had a higher surface roughness than the control samples. The surface of treated samples was generally darker than the control. After exposure to the accelerated weathering, the effect of treatments on surface hydrophobicity was largely lost. The treated samples had less roughness changes than the control after exposure to the weathering, and also their dark color changed to silver-gray. The use of glide plasma with methane gas showed the great potential for creating hydrophobic surfaces on the wood, but it did not last long and lost its effectiveness due to weathering.

Keywords: Plasma, weathering, contact angle, color changes, roughness changes, SEM.