

ارزیابی پارامترهای ماشین‌کاری چوب و کیفیت سطح در فرآیند برش با جت آب بدون ماده ساینده

چکیده

هدف از تحقیق، ارزیابی پارامترهای ماشین‌کاری چوب و کیفیت سطح در فرآیند برش با جت آب بدون ماده ساینده بود. بدین منظور نوع گونه چوبی (راش، بلوط و صنوبر)، سرعت برش (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ متر بر ثانیه) و همچنین جهت برش (موازی و عمود بر الیاف) به عنوان عوامل متغیر تحقیق انتخاب شدند. پس از برش نمونه‌ها با جت آب، تصویربرداری از سطح و لبه نمونه‌ها در محل برش توسط اسکنر با وضوح ۱۲۰۰ dpi انجام شد. برای اندازه‌گیری عمق و شکاف برش در تصاویر به دست آمده، از نرم‌افزار Image J استفاده شد. کیفیت سطح با استفاده از زبری سنج سوزنی ارزیابی شد و پارامترهای زبری سطح شامل R_a و R_z اندازه‌گیری شدند. بیشترین و کمترین مقادیر عمق و شکاف برش به ترتیب برای چوب صنوبر و چوب راش اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که جهت برش تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی پارامترهای برش دارد، به طوری که بیشترین عمق و کمترین شکاف برش در جهت موازی الیاف مشاهده شد. همچنین نتایج نشان دادند با افزایش سرعت برش، عمق برش افزایش یافته و شکاف برش کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین مقادیر پارامترهای زبری سطح به ترتیب در چوب صنوبر ($R_z=136/80 \mu$) و چوب راش ($R_z=115/62 \mu$) مشاهده شد. بر اساس نتایج حاصله می‌توان نتیجه‌گیری کرد، ماشین‌کاری با سرعت بالا در چوب‌های با بافت متراکم و در راستای موازی الیاف می‌تواند منجر به بهبود کیفیت سطح در برش با جت آب گردد.

واژگان کلیدی: جت آب، سرعت برش، جهت برش، عمق برش، شکاف برش، زبری سطح.

پیام مرادپور^{۱*}

امین قلی زاده مهدیخان محله^۲

هادی غلامیان^۱

^۱ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

pmoradpour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

مقدمه

چوب، یکی از قدیمی‌ترین مواد طبیعی می‌باشد که بشر توانسته در طول تاریخ از آن در زمینه‌های مختلفی از قبیل: صنایع ساختمان‌سازی، بسته‌بندی، ساخت مبلمان، کفپوش سازی، قالب‌سازی، نماسازی و غیره استفاده نماید. یکی از عوامل مهم در توسعه هر چه بیشتر کاربردهای چوب، قابلیت بالای ماشین‌کاری و تبدیل آن به محصولی با ارزش افزوده بالا با استفاده از ابزارها و ماشین‌آلات

مختلف می‌باشد. منحصربه‌فرد بودن ویژگی‌های چوب باعث شده است تا فرآیندهای ماشین‌کاری آن نیز با سایر مواد مهندسی متفاوت باشد. در فرآیند برش چوب، شکل هندسی و ویژگی‌های سطح آن می‌تواند دستخوش تغییر گردد [۱]. اهمیت اقتصادی چوب به عنوان یک منبع مهم تجدید پذیر، تلاش‌های گسترده‌ای را برای بهبود ابزار و طراحی ماشین‌آلات و همچنین توسعه تکنولوژی‌های مرتبط در پی داشته است. یکی از روش‌های مهم در

کاهش هزینه‌های اقتصادی، بهینه‌سازی فرآیند برش با تکیه بر ماده اولیه و پارامترهای مرتبط با برش می‌باشد که در نتیجه آن ضریب تولید افزایش یافته و میزان ضایعات و مصرف انرژی کاهش خواهد یافت [۲ و ۳]. در گذشته برای برش چوب از ابزارهای دستی استفاده می‌شد، اما امروزه، با توسعه تکنولوژی، ماشین کاری چوب با استفاده از ماشین-آلات برش با دقت و کیفیت بالا انجام می‌شود [۱]. همان‌طور که می‌دانیم در ماشین کاری‌های سنتی (مانند برش با اره)، تولید اشکال پیچیده، پرداخت بهتر سطح، تلورانس ابعادی کم، ایجاد سوراخ‌های غیر دایره‌ای و منحنی شکل بسیار ریز و به تعداد زیاد در یک قطعه، نرخ تولید بالاتر و تولید قطعات با ابعاد خیلی کوچک بسیار مشکل بوده و فرآیندهای مناسب نیاز داشت. بنابراین برای پاسخگویی به این نیازها، فرآیندهای نوین ماشین کاری رشد و توسعه یافتند. در این فرآیندها، به جای استفاده از ابزارهای سنتی برای بریدن مواد، از انرژی به صورت مستقیم برای برداشتن تراشه از قطعه کار استفاده می‌شود [۴]. فرآیندهای نوین ماشین کاری به سه گروه اصلی الف) مکانیکی، ب) ترموالکتریکی، ج) الکتروشیمیایی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. ماشین کاری با استفاده از جت آب (WJM)^۱ یا ماشین کاری هیدرودینامیک، جزء فرآیندهای مکانیکی بوده و یکی از روش‌های مؤثر برای جداسازی مواد می‌باشد. در این فرآیند از جریان آب (بدون و یا همراه با ماده ساینده) با سرعت بالا به عنوان ابزار برشی استفاده می‌شود. اگر جت آب صرفاً از آب تشکیل شده باشد، تنها برای برشکاری مواد غیرفلزی قابل استفاده است، ولی با اضافه کردن ذرات ساینده به آن می‌تواند برای برشکاری قطعات سخت‌تر و چگال‌تری همچون فلزات، شیشه‌ها و سرامیک‌ها مورد استفاده قرار بگیرد [۴]. در ماشین‌های جت آب از گارنت، یاقوت کبود، کاربید تنگستن، کاربید بور، اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیکون و غیره به عنوان مواد ساینده استفاده می‌شود [۴ و ۵]. اساس کار جت آب به این صورت است که یک پمپ بسیار قوی، آب را با فشار زیاد در حدود ۴۰۰ MPa به داخل یک نازل با قطر خیلی کم هدایت می‌کند، در نتیجه آب سرعتی در حدود ۹۰۰ m/s پیدا می‌کند. مخلوط آب و مواد ساینده

(در صورت اضافه شدن به سیستم) که با فشار زیاد از نازل خارج می‌شوند، عمل برش را انجام می‌دهند. بسته به جنس قطعه کار در حال برش، برداشت ماده ممکن است در اثر سایش، برش و یا شکست در اثر تغییر سریع محل تنش‌های موضعی رخ دهد. بنابراین جت مخلوط آب و ساینده خارج شده از نازل با سرعت بالا، قابلیت برش سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها، سنگ‌ها، فلزات، شیشه، چوب، چرم، اسفنج، فایبرگلاس، پلی‌اتیلن و غیره را به طور کامل دارا است [۴ و ۶]. نوع جت آب، فشار و دبی آب، سرعت برش، نوع و اندازه و دبی ساینده‌ها، طرح و قطر نازل آب و فاصله آن از قطعه کار، نرخ تغذیه، ارتفاع و جهت برش و جنس قطعه کار از عوامل مؤثر در فرآیند برش با جت آب می‌باشند که می‌توانند بر روی پارامترهای ماشین کاری و کیفیت سطح اثرگذار باشند [۴ و ۷].

جت آب یک ابزار برشی است که هرگز کند و سائیده نشده و یا دچار شکستگی نمی‌گردد. ماهیت برش جت آب سرد بوده و مشکلات ناشی از حرارت در فرآیندهای برش با لیزر مانند تغییر شکل فیزیکی، تغییر خواص مکانیکی و ذوب شدن لبه‌ها وجود ندارد. قدرت، دقت و ایمنی برش در فرآیند جت آب در مقایسه با لیزر بیشتر می‌باشد [۴، ۶، ۸]. در استفاده از جت آب برای ماشین کاری، آلودگی صوتی، گردوغبار ناشی از برش (اره، رنده، سنباده) و دوده‌های سمی و خطرناک (در برش با لیزر) تولید نشده، از این رو آلودگی‌های محیطی و خطرات موجود به هنگام ماشین کاری به حداقل می‌رسند. کیفیت بالای برش، امکان برش مواد در تمامی جهات، برش بدون محدودیت تمامی مواد (برش فولاد تا ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر و برخی مواد دیگر تا ضخامت ۵۰۰ میلی‌متر) از امتیازات جت آب در مقایسه با ابزارهای دیگر می‌باشند [۴، ۶، ۹ و ۱۰]. با توجه به مزایا و برتری برش جت آب نسبت به سایر روش‌های بیان شده، این روش می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب در صنایع مختلف از جمله در صنعت چوب باشد. به کارگیری سیستم جت آب می‌تواند با توجه به شکاف برش بسیار کم و تولید ضایعات بسیار ناچیز، هزینه مواد مصرفی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای

کاهش هزینه‌های اقتصادی، بهینه‌سازی فرآیند برش با تکیه بر ماده اولیه و پارامترهای مرتبط با برش می‌باشد که در نتیجه آن ضریب تولید افزایش یافته و میزان ضایعات و مصرف انرژی کاهش خواهد یافت [۲ و ۳]. در گذشته برای برش چوب از ابزارهای دستی استفاده می‌شد، اما امروزه، با توسعه تکنولوژی، ماشین کاری چوب با استفاده از ماشین-آلات برش با دقت و کیفیت بالا انجام می‌شود [۱]. همان‌طور که می‌دانیم در ماشین کاری‌های سنتی (مانند برش با اره)، تولید اشکال پیچیده، پرداخت بهتر سطح، تلورانس ابعادی کم، ایجاد سوراخ‌های غیر دایره‌ای و منحنی شکل بسیار ریز و به تعداد زیاد در یک قطعه، نرخ تولید بالاتر و تولید قطعات با ابعاد خیلی کوچک بسیار مشکل بوده و فرآیندهای مناسب نیاز داشت. بنابراین برای پاسخگویی به این نیازها، فرآیندهای نوین ماشین کاری رشد و توسعه یافتند. در این فرآیندها، به جای استفاده از ابزارهای سنتی برای بریدن مواد، از انرژی به صورت مستقیم برای برداشتن تراشه از قطعه کار استفاده می‌شود [۴]. فرآیندهای نوین ماشین کاری به سه گروه اصلی الف) مکانیکی، ب) ترموالکتریکی، ج) الکتروشیمیایی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. ماشین کاری با استفاده از جت آب (WJM)^۱ یا ماشین کاری هیدرودینامیک، جزء فرآیندهای مکانیکی بوده و یکی از روش‌های مؤثر برای جداسازی مواد می‌باشد. در این فرآیند از جریان آب (بدون و یا همراه با ماده ساینده) با سرعت بالا به عنوان ابزار برشی استفاده می‌شود. اگر جت آب صرفاً از آب تشکیل شده باشد، تنها برای برشکاری مواد غیرفلزی قابل استفاده است، ولی با اضافه کردن ذرات ساینده به آن می‌تواند برای برشکاری قطعات سخت‌تر و چگال‌تری همچون فلزات، شیشه‌ها و سرامیک‌ها مورد استفاده قرار بگیرد [۴]. در ماشین‌های جت آب از گارنت، یاقوت کبود، کاربید تنگستن، کاربید بور، اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیکون و غیره به عنوان مواد ساینده استفاده می‌شود [۴ و ۵]. اساس کار جت آب به این صورت است که یک پمپ بسیار قوی، آب را با فشار زیاد در حدود ۴۰۰ MPa به داخل یک نازل با قطر خیلی کم هدایت می‌کند، در نتیجه آب سرعتی در حدود ۹۰۰ m/s پیدا می‌کند. مخلوط آب و مواد ساینده

¹ Water jet machining

می‌مانند و می‌توانند زبری سطح را ایجاد نمایند [۱۹].

امروزه کنترل شرایط برش در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری جهت پیش‌بینی رفتار چوب و فرآورده‌های چوبی و کیفیت سطح آن، استفاده از حداکثر ظرفیت ابزار و ماشین‌آلات و همچنین بهینه‌سازی شرایط برش جهت عملکرد مناسب فرایندهای ماشین‌کاری از اهمیت زیادی برخوردار است [۲۰]. بهینه‌سازی شرایط برش، از یک سو انرژی مصرفی و ضایعات تولید را در فرایند برش کاهش داده و از سوی دیگر به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولیدی و بهبود کیفیت سطح فرآورده‌های حاصل کمک خواهد کرد. بنابراین بررسی رفتار چوب در فرایند برش با جت آب و درک کاملی از روابط متقابل بین چوب و پارامترهای برش ضروری به نظر می‌رسد. عدم انجام پژوهش‌های لازم در این زمینه در کشور ما، اهمیت علمی و کاربردی این موضوع را دوچندان می‌کند. با توجه به مطالب بیان‌شده، این تحقیق باهدف ارزیابی پارامترهای ماشین‌کاری و کیفیت سطح چوب در فرایند برش با جت آب بدون ماده ساینده، تحت تاثیر دانسیته و بافت چوب، جهت و سرعت برش انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه ماده اولیه و نمونه‌های آزمونی

در این تحقیق از سه گونه چوبی پهن‌برگ پرکاربرد که از کارگاه مبلمان و فرآورده‌های مرکب گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه شده بودند، جهت مطالعه و بررسی ویژگی‌های ماده چوبی در فرآیند برش با جت آب استفاده شد. چوب راش و بلوط با دانسیته متوسط و دارای نقوش زیبا و همچنین چوب صنوبر به‌عنوان گونه چوبی تند رشد با دانسیته پائین انتخاب شدند. مشخصات گونه‌های موردنظر در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مشخصات اولیه گونه‌های تهیه‌شده

گونه چوبی	نام علمی	بافت	دانسیته خشک (gr/cm ³)
چوب راش	<i>Fagus Orientalis</i>	پراکنده آوند	۰/۶۱۷
چوب بلوط	<i>Quercus Castaneaefolia</i>	بخش روزنه‌ای	۰/۶۲۸
چوب صنوبر	<i>Populus Deltoides</i>	پراکنده آوند	۰/۴۵۶

کاهش دهد [۱۱]. البته برش چوب با استفاده از جت آب در مقایسه با مواد غیرچوبی مانند فلزات، شیشه، پلیمرها، به دلیل ویژگی‌های خاص آناتومیکی، فیزیکی، مکانیکی و خصوصیات شیمیایی آن، کمی متفاوت می‌باشد. لازم به ذکر است علاوه بر چوب [۱۲، ۱۳ و ۱۴]، پژوهش‌هایی بر روی برش بامبو [۱۵]، OSB، MDF و تخته سه لایه [۱۶] و همچنین چوب پلاستیک [۱۷]، با استفاده از جت آب انجام شده است. یکی از نگرانی‌های برش چوب با استفاده از جت آب، خاصیت هیگروسکوپیک آن می‌باشد، زیرا چوب در حین فرایند برش و قرار گرفتن در معرض آب، رطوبت را جذب کرده و دچار تغییرات ابعادی می‌شود. نتایج حاصل از تحقیقات اندک انجام‌شده نشان می‌دهند که هنگام بریدن چوب با جت آب، رطوبت فقط به لایه‌های سطحی چوب نفوذ می‌کند و ۲۴ ساعت پس از برش، رطوبت حداکثر تا ۳ درصد بیشتر از قبل از برش بوده و قسمت عمده‌ای از آن را در مدت‌زمان کوتاه‌تری از دست می‌دهد [۱۸]. این نتایج می‌توانند چالش حاصل از برش چوب با جت آب را تا حد زیادی برطرف نمایند. شاید بتوان اظهار داشت، سرعت و فشار زیاد و همچنین جریان سریع آب مانع از خیس شدن عمقی چوب طی این فرایند می‌شود. جهت برش نیز یکی از عوامل مهمی می‌باشد که می‌تواند بر کیفیت سطح برش، اندازه شکاف و عمق برش اثرگذار باشد.

زبری سطح متأثر از نوع فرایند ماشین‌کاری و ساختار چوب می‌باشد. ساختار درونی چوب شامل حفراتی به شکل آوندها، تراکئیدها و حفرات سلولی درون آن می‌باشد. هنگام برش چوب، منافذ در زوایای مختلف بریده می‌شوند، بنابراین حتی در برش‌های بدون معایب حفرات بر روی سطح باقی

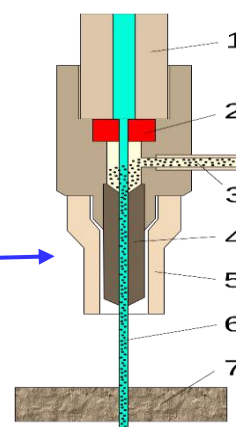
برش نمونه‌های چوبی با استفاده از جت آب و انجام آزمون‌های موردنظر

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، جهت انجام برش از دستگاه جت آب مدل AC servo Motors واقع در شرکت ایران صنعت استفاده شد که مشخصات فنی و تصویر دستگاه جت آب مورد استفاده به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۱) آمده است. برای برش نمونه‌ها سرعت تغذیه 100 mm/min ، قطر نازل 0.8 mm ، فاصله نازل از میز کار 3 cm و طول برش 5 cm در نظر گرفته شد. نمونه‌ها بر اساس طرح آزمایش‌های پیش‌بینی‌شده در تحقیق، به وسیله دستگاه جت آب بریده شدند و جهت جلوگیری از تغییرات رطوبتی پس از برش، دوباره داخل نایلون قرار گرفتند (جدول ۳).

علاوه بر گونه چوبی، سرعت برش ($600, 400, 200$ متر بر ثانیه) و جهت برش (موازی و عمود بر الیاف) به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است در این تحقیق برش در جهت موازی و عمود بر الیاف، به ترتیب با برش طولی (با سطح مماسی) و عرضی چوب همراه بوده است. به منظور تهیه نمونه‌های آزمونی، ابتدا گونه‌های چوبی مورد نیاز با استفاده از اهر نواری به ابعاد $22 \times 12 \times 7$ سانتی‌متر بریده شدند و سپس ابعاد نمونه‌های چوبی توسط رنده و گندگی به $20 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر رسید. نمونه‌های چوبی تهیه‌شده برای رسیدن به رطوبت 12% ، به مدت دو هفته درون اتاق کلیما با دمای 20 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 65% قرار داده شدند.

جدول ۲- مشخصات دستگاه برش جت آب مورد استفاده

مقدار	مشخصه
$3/5 \times 2/5$	ابعاد میز (m^2)
۱۵۰	حداکثر توان (W)
۲۰۰	حداکثر سرعت تغذیه (mm/min)
۹۰۰	حداکثر سرعت برش (m/s)
۳	فاصله نازل از میز کار (cm)
$0.8 - 1$	قطر نازل (mm)



شکل ۲- الف) دستگاه جت آب مورد استفاده در این تحقیق، ب) طرح شماتیک از نازل جت آب و بخش‌های مختلف آن: ۱- ورودی آب با فشار بالا، ۲- یاقوت سرخ یا الماس، ۳- ماده ساینده ۴- مجرای اختلاط، ۵- محافظ، ۶- نازل، ۷- قطعه چوب

جدول ۳- طرح آزمایش‌های پیش‌بینی‌شده در این تحقیق

نوع گونه چوبی	سرعت برش (m/s)	جهت برش*
راش	۲۰۰	موازی با الیاف
		عمود بر الیاف
بلوط	۴۰۰	موازی با الیاف
		عمود بر الیاف
صنوبر	۶۰۰	موازی با الیاف
		عمود بر الیاف

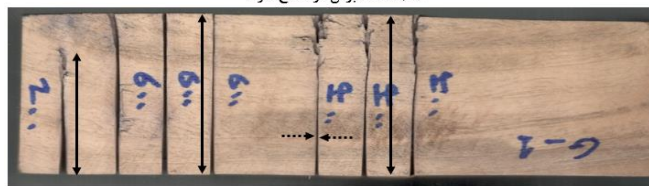
*موازی با الیاف (برش طولی)، عمود بر الیاف (برش عرضی)

دستگاه اسکنر با وضوح ۱۲۰۰dpi تهیه شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار Image J تصاویر به‌دست‌آمده مورد آنالیز قرار گرفته و مقادیر عمق و شکاف برش به دست آمدند (شکل ۳).

بعد از برش نمونه‌ها با دستگاه جت آب، عمق برش، پهنای شکاف برش و زبری سطح نمونه‌های چوبی اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری عمق و شکاف برش، ابتدا تصاویری از سطح و لبه نمونه‌ها در محل برش با استفاده از



الف) شکاف برش در سطح نمونه



ب) عمق و شکاف برش در ضخامت

شکل ۳- اندازه‌گیری عمق (\leftrightarrow) و شکاف برش ($\leftarrow\rightarrow$) در سطح و ضخامت نمونه‌ها

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر عمق برش، شکاف برش و زبری سطح در برش با جت آب بدون ماده ساینده در جدول ۴ آمده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت، به‌جز اثر مستقل سرعت برش بر پارامتر زبری R_a ، اثر مستقل بقیه عوامل متغیر بر عمق و شکاف برش و زبری سطح معنی‌دار می‌باشند. همچنین اثر متقابل عوامل متغیر بر پارامترهای برش و زبری سطح، به‌غیراز اثر متقابل (گونه چوبی \times سرعت برش) و (جهت برش \times سرعت برش) بر شکاف برش و همچنین اثر متقابل (جهت برش \times سرعت برش) بر پارامتر زبری R_a معنی‌دار می‌باشند.

جهت بررسی کیفیت سطح نمونه‌ها پس از برش توسط دستگاه جت آب، پارامترهای زبری R_a و R_z با استفاده از دستگاه زبری سنج سوزنی مدل Mitutoyo Surftest SJ-201 و بر اساس استاندارد DIN EN ISO 4287(1998-10) [۲۱] اندازه‌گیری شدند.

به‌منظور تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، از طرح آزمایش‌های فاکتوریل کاملاً تصادفی استفاده شد. بر این اساس از ترکیب سطوح عوامل متغیر ۱۸ تیمار (سه نوع گونه چوبی \times سه سرعت برش \times دو جهت برش) به دست آمد. برای هر تیمار سه نمونه تهیه و برای هر تیمار حداقل ۶ تکرار انجام شد. بعد از جمع‌آوری داده‌ها برای مقایسه و تحلیل نتایج از آزمون تجزیه واریانس چند طرفه استفاده شد و میانگین داده‌ها با آزمون دانکن مقایسه شدند.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر پارامترهای برش و زبری سطح در برش با جت آب

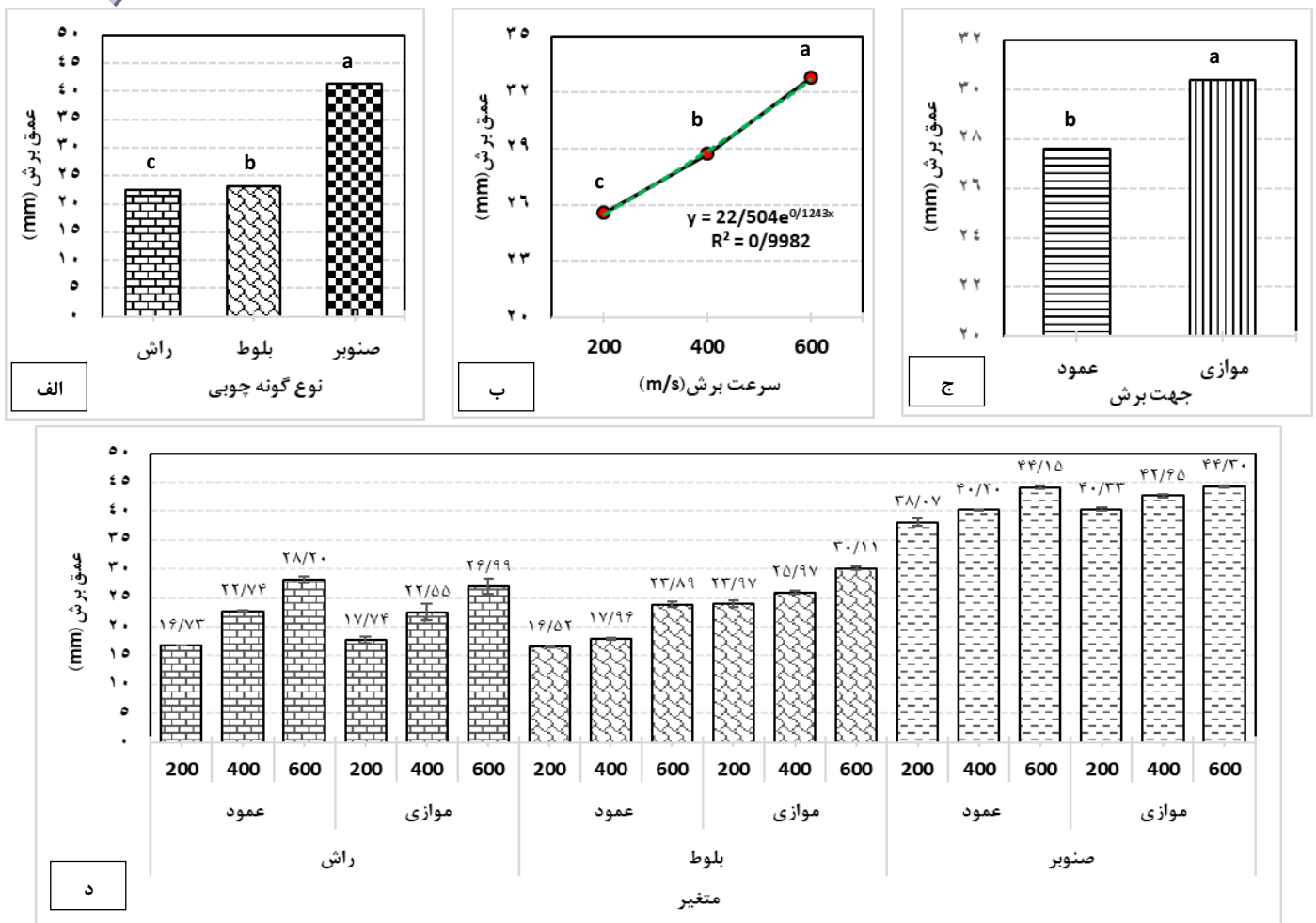
Rz		Ra		شکاف برش		عمق برش		درجه آزادی	منابع تغییرات
Sig.	MS	Sig.	MS	Sig.	MS	Sig.	MS		
۰/۰۰۰	۴۱۱۳/۲۶**	۰/۰۰۰	۴۷/۵۰**	۰/۰۰۰	۳/۲۷۳**	۰/۰۰۰	۴۱۸۵/۴۷**	۲	گونه چوبی
۰/۰۰۰	۱۲۴۵۷/۵۴**	۰/۰۰۰	۶۹/۶۳**	۰/۰۱۲	۰/۱۱۳*	۰/۰۰۰	۲۱۰/۸۴**	۱	جهت برش
۰/۰۰۳	۲۶۲/۵۴**	۰/۲۶۷	۶/۹۳ ns	۰/۰۰۶	۰/۰۹۳**	۰/۰۰۰	۴۷/۱۶**	۲	سرعت برش
۰/۰۰۰	۱۰۶۰۵/۶۶**	۰/۰۰۰	۳۱۶/۱۴**	۰/۰۰۰	۰/۲۱۵**	۰/۰۰۰	۱۳۷/۱۸**	۲	گونه چوبی × جهت برش
۰/۰۰۰	۶۰۲۳/۶۲**	۰/۰۰۰	۲۰۷/۱۱**	۰/۷۲۹	۰/۰۰۹ ns	۰/۰۰۰	۳۰/۱۷**	۴	گونه چوبی × سرعت برش
۰/۰۰۰	۲۸۴۰/۸۴**	۰/۲۳۷	۷/۵۶ ns	۰/۶۵۸	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۰۰	۱۳/۳۹**	۲	جهت برش × سرعت برش
۰/۰۰۰	۲۱۵۲/۸۲**	۰/۰۰۰	۱۶۵/۶۳**	۰/۰۰۲	۰/۰۸۰**	۰/۰۰۲	۱/۵۵**	۴	گونه چوبی × جهت برش × سرعت برش
-	۴۲/۱۳	-	۵/۱۷	-	۰/۰۱۷	-	۰/۳۳۶	۹۰	خطا
-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۸	کل

(**): معنی داری در سطح ۱ درصد، (*): معنی داری در سطح ۵ درصد، (ns): غیر معنی دار، (MS): میانگین مربعات)

عمق برش

در شکل ۴ (الف-د)، اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر عمق برش به همراه گروه بندی میانگین ها و انحراف - معیار داده ها ارائه شده است. نتایج نشان می دهند، مقدار عمق برش در چوب صنوبر در حدود ۸۰ درصد بیشتر از چوب راش و بلوط می باشد (شکل ۴- الف). از آنجای که در یک شرایط برابر، عمق برش رابطه عکس با دانسیته چوب دارد، بنابراین این اختلاف می تواند ناشی از دانسیته پائین چوب صنوبر در مقایسه با دانسیته دو گونه چوبی دیگر باشد. عمق برش برای چوب راش و بلوط مقادیر تقریباً مشابهی داشت، با این تفاوت که در چوب بلوط به دلیل داشتن بافت بخش روزه ای و حضور عناصر آوندی درشت در بخش چوب بهاره آن و همچنین وجود اشعه چوبی پهن تر، عمق برش کمی بیشتر از چوب راش به دست آمد. بنابراین نوع گونه چوبی می تواند یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار در فرآیند برش جت آب باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهند با افزایش سرعت برش از ۲۰۰ m/s به ۶۰۰ m/s، عمق برش ۲۸ درصد افزایش یافته است (شکل ۴- ب). عمق برش رابطه مستقیم با سرعت برش دارد، زیرا با افزایش سرعت برش، شدت آب خروجی از نازل افزایش یافته و این موضوع می تواند منجر به

افزایش عمق برش گردد. شکل ۴- ج نشان می دهد مقادیر عمق برش در راستای الیاف بیشتر از جهت عمود بر الیاف می باشد. همان طور که ذکر شد، جهت برش موازی و عمود بر الیاف، به ترتیب برش طولی و عرضی چوب را به همراه داشته است. در برش طولی، سطح برش ایجاد شده به دلیل مماس بودن بر دوایر سالیانه عمدتاً مماسی، و در برش عرضی مقطع عرضی چوب می باشد. در برش عرضی بایستی تمامی عناصر چوبی (آوند و فیبر و پارانشیم های چوبی) از خط برش برداشته شوند. برش تمامی عناصر چوبی به نیروی برش بیشتری نیاز دارد، بنابراین این حالت می تواند عمق برش کمتری را نتیجه دهد. در صورتی که در برش طولی و موازی الیاف بسته به محل برش، ممکن است فقط بخشی از این عناصر در فرآیند برش درگیر باشند. به طور کلی می توان اظهار داشت، نوع گونه چوبی، سرعت و جهت برش از عوامل تأثیرگذار بر عمق برش می باشند. نتایج مربوط به اثر متقابل عوامل متغیر بر عمق برش در شکل ۴- د آمده است. کمترین و بیشترین عمق برش به ترتیب برای چوب بلوط با سرعت برش ۲۰۰ m/s در راستای عمود بر الیاف (۱۶/۵۲ mm) و چوب صنوبر با سرعت برش ۶۰۰ m/s در راستای موازی الیاف (۴۴/۳۰ mm) به دست آمده است.

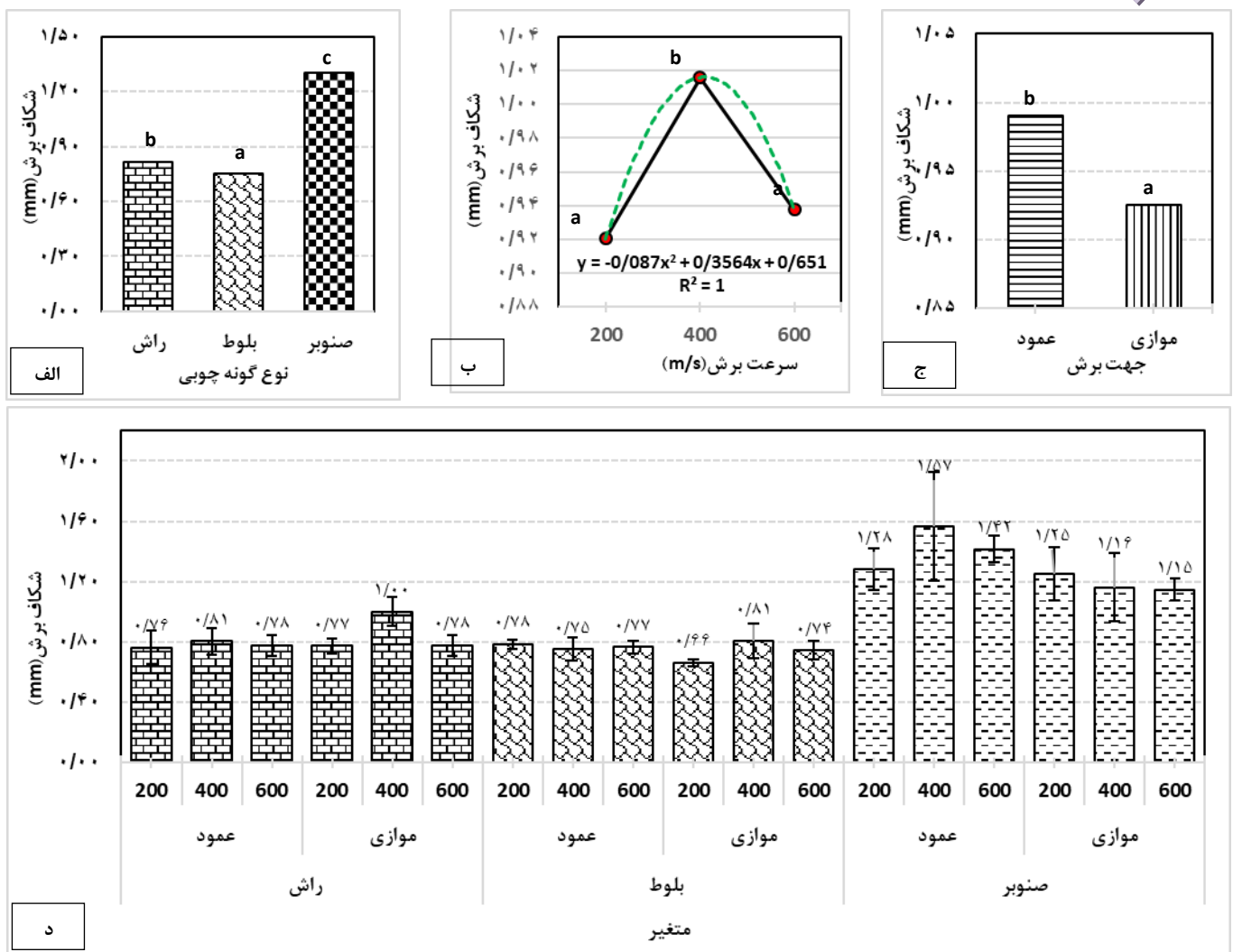


شکل ۴- اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر عمق برش

شکاف برش

۴۰۰ m/s، ابتدا روند افزایشی داشته و سپس با افزایش سرعت برش به ۶۰۰ m/s کاهش یافته و به شکاف برش حاصل از سرعت برش ۲۰۰ m/s رسیده است (شکل ۵-د). مطابق با شکل ۵-ج می‌توان پی برد که مقدار شکاف برش در برش طولی و در راستای الیاف کمتر از برش عرضی و در جهت عمود بر الیاف می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از برداشته شدن تراشه بیشتر از چوب در برش عرضی در محدوده خط برش باشد. نتایج زبری سطح که در ادامه آمده است مؤید این مطلب می‌باشد. نتایج مربوط به اثر متقابل عوامل متغیر نشان می‌دهند، کمترین و بیشترین شکاف برش به ترتیب مربوط به چوب راش با سرعت برش ۲۰۰ m/s در راستای موازی الیاف (۰/۱۶۶ mm) و چوب صنوبر با سرعت برش ۴۰۰ m/s در جهت عمود بر الیاف (۱/۵۷ mm) می‌باشد (شکل ۵-د).

اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر شکاف برش به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف معیار داده‌ها در شکل ۵ (الف-د) ارائه شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری شکاف برش نشان می‌دهند که چوب صنوبر در مقایسه با چوب راش و بلوط از شکاف برش بیشتری برخوردار می‌باشد (شکل ۵-الف). شکاف برش در فرایند برش با جت آب تابع قطر خروجی نازل آب و ارتفاع نازل از سطح نمونه می‌باشد. علیرغم ثابت بودن هر دو پارامتر ذکر شده، افزایش شکاف برش در چوب صنوبر، احتمالاً ناشی از دانسیته پایین آن و برداشته شدن تراشه بیشتر از چوب در محدوده خط برش در مواجهه با آب تحت فشار بالا می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند مقدار شکاف برش با افزایش سرعت برش از ۲۰۰ m/s به



شکل ۵- اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر شکاف برش

زبری سطح

به دست آمده با تحقیقات انجام شده توسط Gerencsér و Bejó [۱۸]، Kminiak و Gaff [۲۲] مطابقت دارد. بیشترین زبری سطح در نمونه‌های با سرعت برش 200 m/s به دست آمد. مطابق با نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که اثر سرعت برش بر روی پارامترهای زبری از یک روند مشخصی تبعیت نمی‌کند، اما می‌توان گفت در سرعت بالاتر مقدار زبری سطح کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که همیشه زبری سطح ایجاد شده در فرایند جت آب به‌طور قابل‌توجهی کمتر از زبری سطح حاصل از رنده‌کاری و یا اره‌کشی چوب می‌باشد [۱۸].

اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر پارامترهای زبری به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آمده است. نتایج نشان می‌دهند، زبری سطح به دلیل دانسیته پائین در چوب صنوبر بیشتر از چوب راش و بلوط می‌باشد. علاوه بر دانسیته، بافت و رطوبت چوب از عوامل اثرگذار بر کیفیت سطح می‌باشند. با وجود اینکه چوب بلوط دانسیته بیشتری نسبت به چوب راش دارد، ولی به دلیل داشتن بافت بخش روزه‌ای دارای زبری سطح بیشتری می‌باشد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که زبری سطح در برش موازی الیاف کمتر از جهت عمود بر الیاف می‌باشد. برش در جهت عمود بر الیاف به دلیل قطع تمامی عناصر چوبی در حین برش می‌تواند زبری سطح را افزایش دهد. نتایج

جدول ۵- اثر مستقل عوامل متغیر بر پارامترهای زبری

عوامل متغیر		Ra(μ)	Rz(μ)
گونه چوبی	راش	۲۰/۵۴(b)	۱۱۵/۶۲(a)
	بلوط	۲۰/۱۸(b)	۱۲۸/۶۸(b)
	صنوبر	۱۸/۳۹(a)	۱۳۶/۸۰(c)
جهت برش	موازی با الیاف	۱۸/۹۰(a)	۱۱۶/۳۰(a)
	عمود بر الیاف	۲۰/۵۱(b)	۱۳۷/۷۷(b)
سرعت برش	۲۰۰	۱۹/۵۷(a)	۱۲۹/۲۷(b)
	۴۰۰	۲۰/۱۹(a)	۱۲۴/۰۳(a)
	۶۰۰	۱۹/۳۵(a)	۱۲۷/۸۰(b)

اعداد داخل پرانتز گروه‌بندی میانگین‌ها را نشان می‌دهند.

جدول ۶- اثر متقابل عوامل متغیر بر پارامترهای زبری

گونه چوبی	جهت برش	سرعت برش	Ra(μ)		Rz(μ)	
			میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
راش	موازی با الیاف	۲۰۰	۱۷/۴۶	۱/۰۱	۱۱۰/۹۶	۹/۸۸
		۴۰۰	۲۲/۲۹	۰/۶۲	۷۷/۶۸	۰/۱۷
		۶۰۰	۲۸/۵۸	۱/۸۰	۸۷/۹۱	۱/۷۲
عمود بر الیاف	موازی با الیاف	۲۰۰	۲۱/۳۸	۲/۱	۱۶۷/۷۳	۲/۹۲
		۴۰۰	۱۶/۲۴	۲/۰۸	۱۰۵/۴۲	۲/۷۴
		۶۰۰	۱۷/۳۲	۱/۲۳	۱۴۴۷/۰۱	۳/۶۰
بلوط	موازی با الیاف	۲۰۰	۲۲/۳۵	۰/۸۹	۱۰۳/۴۴	۵/۲۰
		۴۰۰	۲۳/۸۸	۰/۲۴	۱۳۷/۰۱	۱/۵۲
		۶۰۰	۱۱/۴۶	۱/۰۰	۱۷۱/۹۶	۹/۱۲
عمود بر الیاف	موازی با الیاف	۲۰۰	۱۹/۱۹	۳/۹۲	۱۲۰/۲۵	۱۹/۰۰
		۴۰۰	۲۶/۱۶	۳/۵۶	۱۲۲/۷۶	۴/۹۷
		۶۰۰	۱۸/۰۴	۶/۲۲	۱۱۶/۶۸	۴/۷۹
صنوبر	موازی با الیاف	۲۰۰	۱۷/۷۰	۲/۰۹	۱۱۷/۷۵	۶/۸۹
		۴۰۰	۱۲/۳۳	۰/۷۷	۱۱۹/۶۵	۲/۵۶
		۶۰۰	۱۴/۰۹	۱/۰۶	۱۲۰/۲۹	۵/۵۷
عمود بر الیاف	موازی با الیاف	۲۰۰	۱۹/۳۸	۱/۰۱	۱۵۵/۵۰	۳/۶۱
		۴۰۰	۲۰/۲۸	۰/۹۷	۱۸۱/۷۰	۱/۹۳
		۶۰۰	۲۶/۶۰	۱/۲۱	۱۲۵/۹۵	۱/۸۰

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این تحقیق مشخص شد که علاوه بر بافت چوب و دانسیته آن، سرعت و جهت برش از فاکتورهای مؤثر بر پارامترهای ماشین‌کاری و کیفیت سطح در فرایند برش با جت آب می‌باشند. نتایج حاصل نشان دادند که چوب صنوبر در مقایسه با چوب راش و بلوط از عمق و شکاف برش و همچنین از زبری سطح

بیشتری برخوردار می‌باشد که ناشی از دانسیته پائین چوب صنوبر در مقایسه با دانسیته چوب راش و بلوط می‌باشد. عمق برش در چوب بلوط به دلیل داشتن بافت بخش روزه‌ای و حضور عناصر آوندی درشت در بخش چوب بهاره آن و همچنین وجود اشعه چوبی پهن‌تر، کمی بیشتر از چوب راش به دست آمد. بر طبق نتایج، با افزایش سرعت برش، شدت آب خروجی از نازل افزایش یافته و این موضوع منجر به افزایش عمق برش گردید. مقادیر

مختلف، اثر انواع مواد ساینده و غیره می‌توانند از موضوعات متنوع برای پژوهش‌های آتی باشند.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد با حمایت مالی معاونت علمی دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با شمار گزنت ۳۰۵۴۱/۶/۱۳ انجام گرفته است.

بهینه پارامترهای برش و کیفیت سطح بالا در سرعت برش 60 m/s مشاهده شد. بیشترین عمق برش و کمترین شکاف برش، در راستای موازی الیاف به دست آمد. برش در جهت عمود بر الیاف به دلیل قطع تمامی عناصر چوبی در حین برش می‌تواند زبری سطح را افزایش داد. بررسی رفتار کامپوزیت‌های چوب-سیمان و چوب-پلیمر، مطالعه اثر انواع پوشش‌دهنده‌ها برای کاهش جذب آب چوب در فرایند برش با جت آب و همچنین ارزیابی تأثیر نرخ تغذیه، تغییرات فشار آب، استفاده از نازل‌های آب با قطر

منابع

- [1] Koch, P., 1964. Wood machining processes. The Ronald Press Company, New York, USA, 530 p.
- [2] Bocquet, J.C. and Noel, J., 1987. June. Sensitive skin-pressure and strain sensor with optical fibres. In Structural Mechanics of Optical Systems II. International Society for Optics and Photonics. 748:63-67
- [3] Orłowski, K., 2010. The fundamentals of narrow kerf sawing: the mechanics and quality of cutting, Technical University in Zvolen, Slovakia, 123p.
- [4] Bani Mostafa Arab, N., Farivar, B. and fathi, S., 2012. Advanced machining processes. Azadeh publishers, Tehran.428p.
- [5] Khan, A. A. and Haque, M. M., 2007. Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. Journal of materials processing technology, 191(1-3): 404-407.
- [6] McGeough, J.A., 1988. Advanced methods of machining. Chapman and Hall. New York, USA, 241P.
- [7] Kminiak, R., Barcik, S. and Kvietkova, M., 2011. The influence of material properties of native wood on kerf width at abrasive water jet cutting process. acta facultatis xylogologiae zvolen, 53(2): 43-51.
- [8] Badgujar, P.P. and Rathi, M.G., 2014. Abrasive Water jet Machining-A State of Art. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN, 2278-1684.
- [9] Engemann, B.K., 1981. Water jet cutting of fiber reinforced composite-materials. Kunststoffe-german plastics, 71(5): 279-280.
- [10] Norwood, J.A. and Johnston, C.E., 1984. New adaptations and applications for water knife cutting. In Proc., 7th Int. Symposium on Jet Cutting Technology (pp. 369-388).
- [11] Dixit, A., Dave, V. and Baid, M.R., 2015. Water jet machining: an advance manufacturing process. International Journal of Engineering Research and General Science, 3(2): 288-292.
- [12] Barčík, Š., Kvietková, M., Gašparík, M. and Kminiak, R., 2013. Influence of technological parameters on lagging size in cutting process of solid wood by abrasive water jet. Wood Research, 58(4): 627-636.
- [13] Gerencsér, K. and Bejón, L., 2007. Investigations into the water jet cutting of solid wood. Wood Research, 52(2):57-64.

- [14] Wang, Z., 2012. An investigation on water jet machining for hardwood floors. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3): 55-59.
- [15] Xie, W., Fang, J., Wang, Z. and Huang, L., 2020. Optimization of technological parameters of water jet cutting of red oak and bamboo based on three-dimensional surface topography measurement. *BioResources*, 15(2): 3270-3277.
- [16] Barčík, Š., Kvietková, M. and Aláč, P., 2011. Effect of the chosen parameters on deflection angle between cutting sides during the cutting of agglomerated materials by water jet. *Wood Research*, 56(4):577-588.
- [17] HutYROVÁ, Z., ŠČUČKA, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P. and ZELEŇÁK, M., 2016. Turning of wood plastic composites by water jet and abrasive water jet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5-8): 1615-1623.
- [18] Gerencsér, K. and Bejő, L., 2007. Investigations into the water jet cutting of solid wood. *Wood Research*, 52(2):57-64.
- [19] Csanády, E. and Magoss, E., 2013. *Mechanics of wood machining*. Springer, Berlin, Germany, 320p.
- [20] Eyma, F., Méausoone, P. J. and Martin, P., 2004. Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. *Journal of materials processing technology*, 148(2): 220-225.
- [21] Geometrical Product Specifications (GPS)–Surface Texture: Profile Method–Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. EN ISO 4287, 1998.
- [22] Kminiak, R. and Gaff, M., 2015. Roughness of surface created by transversal sawing of spruce, beech, and oak wood. *BioResources*, 10(2):2873-2887.

Evaluation of wood machining parameters and surface quality in cutting process by water jet without abrasive material

Abstract

This study aimed at the evaluation of wood machining parameters and surface quality upon using a water jet without abrasive material. Hence, wood species (beech, oak, and poplar), cutting velocity (200, 400 and, 600 m/s), and cutting direction (parallel and perpendicular to the grain) were chosen as variables. After cutting samples with a water jet, the samples were scanned from edge and surface using a 1200 dpi scanner. For analyzing the depth of cut and kerf width, ImageJ software was used. The surface quality was evaluated using a stylus profilometer, and the surface roughness parameters including Ra, and Rz were measured. The highest and lowest values of depth of cut and kerf width were measured for poplar and beech woods, respectively. According to the results, it can be stated that the cutting direction has a significant effect on the machining parameters so that the maximum depth of cut and the lowest kerf width was observed in the direction parallel to the grain. Also, the results showed that with increasing cutting velocity, the depth of cut increases, and kerf width decreases. The highest and lowest values of surface roughness parameters were observed in poplar ($Rz=136/8\mu$), and beech ($Rz=115/62\mu$) woods, respectively. Based on the results, it can be concluded that high-speed machining in woods with dense texture and parallel to grain can improve the surface quality in water jet cutting.

Keywords: Water jet, Cutting velocity, Cutting direction, Depth of cut, Kerf width, Surface roughness.

P. Moradpour^{1*}
A. Gholizadeh Mehdikhan Mahalleh²
H. Gholamiyan¹

¹ Assistant Prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² M.Sc. Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
pmoradpour@ut.ac.ir

Received: 2021/09/27
Accepted: 2021/12/04