

بررسی رابطه پرستون بین میانگین طول و زاویه میکروفیبریل تراکتیدها در چوب فشاری و مقابل فشاری سرو سیمین (*Cupressus arizonica*)

چکیده

در یک درخت سوزنی‌برگ، غالباً افزایش طول تراکتیدها با کاهش زاویه میکروفیبریل‌های لایه S_۲ (زاویه میکروفیبریل) همراه است. پرستون رابطه‌ای ریاضی بین این دو ویژگی ارائه داده که صحت آن تاکنون به صورت مستقل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، در این پژوهش، روند تغییرات طول و زاویه میکروفیبریل تراکتیدها از مغز تا پوست در چوب فشاری و مقابل فشاری گونه سرو سیمین (*Cupressus arizonica*) مورد بررسی قرار گرفت و تلاش شد تا رابطه بین این دو متغیر به صورت کمی تعیین گردد. نتایج نشان داد که میانگین طول تراکتیدهای چوب فشاری کوتاه‌تر و میانگین زاویه میکروفیبریل آن‌ها بیشتر از چوب مقابل فشاری بوده و در هر دو منطقه با دور شدن از مغز، متوسط طول تراکتیدها افزایش یافته و زاویه میکروفیبریل آن‌ها کاهش می‌یابد. در هر دو منطقه، رابطه قوی و معکوسی بین این دو ویژگی یافت شد که این رابطه در چوب فشاری و حالت کلی (مجموع چوب فشاری و مقابل فشاری) از نوع غیرخطی بود. در مجموع، وجود رابطه پرستون بین این دو ویژگی آناتومی مورد تأیید قرار گرفت.

واژگان کلیدی: چوب واکنشی، زاویه میکروفیبریل، طول تراکتید، روش «ترک‌دهی دیواره»، آناتومی چوب.

رضا اولادی^{۱*}

کامبیز پورطهماسی^۲

داوود پارسا پژه^۳

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

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

^۳ استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

oladi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

مقدمه

ویژگی‌های ظاهری و میکروسکوپی منحصربه‌فردی است که آن را از چوب نرمال متمایز می‌کند [۱]. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به رنگ تیره‌تر، تراکتیدهای کوتاه‌تر با شکل گرد یا بیضوی، دیواره ضخیم و شکاف‌های حلزونی در دیواره‌شان اشاره کرد [۲]. از آنجاکه این نوع چوب در سوزنی‌برگان به نسبت شایع بوده و ویژگی‌های کاربردی‌اش نیز متفاوت از چوب نرمال است، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است.

چوب فشاری یک چوب تغییر شکل یافته بوده که در قسمت پایین شاخه‌ها و یا تنه‌های درختان سوزنی‌برگ که از حالت عمودی منحرف شده‌اند پدید می‌آید. چوب فشاری در اثر نیروی وزن درخت و تمایل آن به یک سمت و در نتیجه واکنش تنه برای حفظ تعادل تشکیل می‌شود. علاوه بر این ممکن است در درختانی که برای مدت کوتاهی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند بهمن و غیره قرار می‌گیرند نیز ایجاد شود. این چوب معمولاً دارای

از آنجاکه در زمان تشکیل لایه S_2 ، طول شدن سلولی به پایان رسیده است؛ باید این‌گونه فرض کرد که زاویه میکروفیبریل متأثر از طول فیبر است، نه برعکس. باین حال ارتباط علت و معلولی بین زاویه میکروفیبریل و طول تراکئیدها یا فیبرها هنوز به‌درستی درک نشده است. Preston (۱۹۴۸) نشان داد که متوسط طول تراکئید (L) و متوسط زاویه میکروفیبریل (α) تحت رابطه زیر باهم مرتبط‌اند [۱۰]:

$$L = a + b \times \cot \alpha \quad (1)$$

در این معادله، a و b ثابت‌هایی هستند که مقادیرشان با توجه به گونه چوبی و اینکه کدام لایه سلولی مدنظر باشد متفاوت است. این ارتباط ریاضی با بررسی چوب نرمال گونه‌ای کاج حاصل آمده و بعدها در چوب نرمال [۱۱ و ۱۲] یا فشاری [۱۳] چندگونه سوزنی‌برگ دیگر نیز مورد تأیید قرار گرفته است. باین‌حال، پژوهش‌های مستقل چندانی برای راستی آزمایشی این معادله انجام نشده و محدود پژوهش‌های انجام‌شده نیز به نتایج متناقضی دست‌یافته‌اند [۱۴]. باآنکه در این پژوهش‌ها همبستگی معنی‌دار و منفی بین این دو ویژگی حاصل آمده ولی نوع رابطه ریاضی یافته شده از نوع خطی ساده [۱۵ و ۱۶] تا تابع درجه‌دو [۷] متغیر بوده است.

از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش بررسی نوع رابطه بین میانگین طول تراکئیدها و زاویه میکروفیبریل آن‌ها در چوب فشاری و مقابل فشاری سرو سیمین (*Cupressus arizonica*) است. علاوه بر این، روند تغییرات این دو ویژگی از سمت مغز به پوست به تفکیک نوع چوب (فشاری و مقابل فشاری) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. طبق بررسی‌های کتابخانه‌ای انجام‌شده، تاکنون تنها دو پژوهش تلاش در کمی کردن رابطه بین طول تراکئیدها و زاویه میکروفیبریل در چوب فشاری داشته‌اند که نتایج متناقضی از آن‌ها حاصل آمده است. Wardrop و Dadswell (۱۹۵۰)، رابطه پرستون (معادله ۱) را در چوب فشاری مورد تأیید قرار دادند [۱۳] ولی Kibblewhite و همکاران (۲۰۰۵) ارتباط بین طول تراکئیدها و زاویه میکروفیبریل در چوب فشاری را به‌مراتب قوی‌تر از چوب نرمال گزارش کرده‌اند [۱۷]. از این‌رو لازم است این ارتباط

طول تراکئید و زاویه میکروفیبریل لایه S_2 دو ویژگی مهم آناتومی چوب بوده که نقش مهمی در شکل‌گیری برخی از رفتارهای مکانیکی و فیزیکی چوب و کیفیت محصولات چوبی و کاغذی بازی می‌کنند. طول تراکئیدها یک عامل مهم در تعیین ویژگی‌های نهایی کاغذ بوده و زاویه میکروفیبریل تأثیر مهمی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب دارد. یک تراکئید طول‌تر شانس اتصال بین الیاف بیشتری از یک تراکئید کوتاه داشته و از این‌رو مقاومت کششی کاغذ مستقیماً تحت تأثیر طول الیاف (در اینجا تراکئیدها) قرار دارد [۲]. زاویه میکروفیبریل نیز مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی میزان مدول الاستیسیته و غیریکنواختی هم‌کشیدگی (هم‌کشیدگی طولی و مماسی) چوب بوده [۳] و همچنین بر سختی چوب و انرژی گسیختگی کاغذ [۴] نیز تأثیرگذار است. به‌طورکلی، الیاف بلندتر و زاویه میکروفیبریل کم‌تر منجر به محصولات چوبی و کاغذی باکیفیت‌تری می‌شوند. این دو ویژگی رابطه معکوسی باهم دارند. به این معنی که الیاف کوتاه، میکروفیبریل‌هایی با زاویه بزرگ دارند که با افزایش طول تراکئید این زاویه کاهش می‌یابد. در یک درخت، معمولاً هر بخش از چوب که الیاف بلندتری دارد، زاویه میکروفیبریل الیاف در آن منطقه کم‌تر است و برعکس. الیاف بلند با میکروفیبریل عمودتر در چوب بالغ و حلقه‌های نزدیک‌تر به پوست دیده می‌شود درحالی‌که جوان‌چوب، چوب شاخه و حلقه‌های رویشی نزدیک‌تر به مغز درخت، الیاف کوتاه‌تر با میکروفیبریل‌های منحرف‌تری دارند [۵]. این ارتباط قوی بین طول تراکئید و زاویه میکروفیبریل در بیشتر پژوهش‌ها به اثبات رسیده است [۶-۸]. باین‌حال در معدودی از مطالعات ارتباطی بین این دو ویژگی یافت نشد [۹]. به‌طورکلی، میانگین زاویه میکروفیبریل لایه S_2 در چوب بالغ بین ۵ تا ۲۰ درجه بوده، درحالی‌که اعداد بسیار بزرگ‌تری در جوان‌چوب سوزنی‌برگان (تا ۵۵ درجه) گزارش شده است [۳]. تراکئیدهای چوب بالغ سوزنی‌برگان ممکن است سه تا چهار برابر طول‌تر از تراکئیدهای جوان‌چوب باشند ولی به‌طور میانگین، طول تراکئیدهای چوب بالغ حدود ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از تراکئیدهای جوان‌چوب است [۵].

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

چهار درخت از جنگل مصنوعی سرو سیمین (*Cupressus arizonica*) دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انتخاب شدند. این درختان به علت انحراف شدید تنه از حالت عمودی و امکان سقوط، لازم القطع بودند. از آنجاکه کج بودن ساقه در درخت سوزنی‌برگ معمولاً باعث ایجاد چوب فشاری در قسمت زیرین آن می‌شود، انتظار می‌رفت که این چهار درخت دارای چوب فشاری باشند. دیسکی به ضخامت حدود ۱۰ سانتیمتر از ارتفاع برابرسینه هر درخت تهیه شد. میزان برون مرکزی در این درختان در جدول ۱ آورده شده است.

در چوب فشاری گونه‌های دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد. [۳]

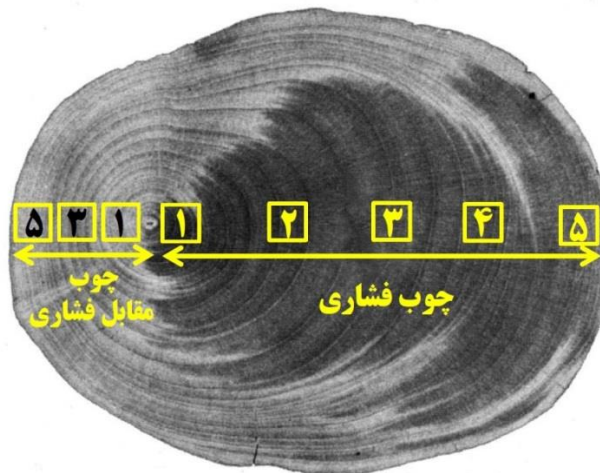
فرضیات این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- میانگین طول تراکتیدها و زاویه میکروفیبریل آن‌ها از مغز به سمت پوست در هر دو نوع چوب فشاری و مقابل فشاری، به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابد؛ ۲- همبستگی معنی‌دار آماری بین این دو ویژگی در هر دو نوع چوب وجود دارد و ۳- رابطه پرستون بهترین معادله برای توصیف کمی نحوه ارتباط این دو ویژگی است. این فرضیات با اندازه‌گیری طول تراکتید و زاویه میکروفیبریل در قسمت‌های مختلف چوب فشاری و مقابل فشاری چهار درخت سرو سیمین مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱- شعاع قسمت فشاری و مقابل فشاری و نسبت این دو در درختان سرو سیمین مورد بررسی.

شماره درخت	شعاع قسمت فشاری (cm)	مقابل فشاری	نسبت
۱	۳۰	۱۴	۲/۱۴
۲	۲۷	۱۳	۲/۰۷
۳	۲۱	۱۷	۱/۲۳
۴	۲۹	۱۳	۲/۲۳

قسمت مقابل فشاری کمابیش حاوی همان حلقه‌های رویشی‌ای بود که در مکعب شماره یک قسمت فشاری وجود داشت. باین‌حال تطابق دقیق حلقه‌های رویشی مشکل بود. ۵ مکعب انتخاب شده از بخش فشاری به ترتیب «نزدیک‌ترین به مغز»، «نزدیک مغز»، «وسط»، «نزدیک پوست» و «نزدیک‌ترین به پوست» نام‌گذاری شدند. ۳ مکعب حاصل از چوب مقابل فشاری نیز به ترتیب متناظر با نمونه‌های نزدیک‌ترین به مغز، وسط و نزدیک‌ترین به پوست بودند (شکل ۱). از طرف طول، این مکعب‌ها به دو قسمت مساوی تقسیم شدند تا از هر مکعب دو بلوک $۲ \times ۲ \times ۲$ سانتی‌متری مکعب حاصل آید. یکی از بلوک‌ها برای تعیین متوسط طول تراکتیدها و دومی برای تعیین میانگین زاویه میکروفیبریل تراکتیدها استفاده شدند.

در مقطع تازه بریده شده این درختان، رنگ قسمت فشاری صورتی تا قرمز تیره دیده می‌شد که تقریباً کل پهنای حلقه‌های رویش آن قسمت را - به جز در درخت سه - می‌پوشاند. درختان تقریباً هم‌سن و ۳۵ تا ۴۰ ساله بودند. در قسمت فشاری و از مغز تا پوست پنج مکعب $۴ \times ۲ \times ۲$ سانتی‌متری (مماسی \times شعاعی \times طولی) تهیه و شماره‌گذاری شدند. فواصل این مکعب‌ها با یکدیگر برابر بوده، به طوری که مکعب نخست چسبیده به مغز و مکعب پنجم دقیقاً از کنار پوست بریده شد. به همین شیوه از قسمت مقابل فشاری نیز سه مکعب تهیه شد (شکل ۱). به طور متوسط هر مکعب در قسمت فشاری دو تا چهار و در قسمت مقابل فشاری، پنج تا هشت حلقه رویشی را در برمی‌گرفت. نمونه‌های مقابل فشاری متناظر با نمونه‌های فشاری تهیه شدند. بدین صورت که مثلاً مکعب شماره یک



شکل ۱- تهیه پنج نمونه $4 \times 2 \times 2$ سانتی متری از مغز تا پوست در قسمت فشاری و سه بلوک متناظر از قسمت مقابل فشاری چوب در دیسک سرو سیمین. بلوک شماره ۱: نزدیک ترین به مغز؛ بلوک شماره ۲: نزدیک مغز؛ بلوک شماره ۳: وسط؛ بلوک شماره ۴: نزدیک پوست؛ بلوک شماره ۵: نزدیک ترین به پوست. تصویر اصلی برگرفته از [۲]

تراکتیدهای گزارش شده برای هر بلوک چوبی، میانگین طول ۸۰ تا ۱۲۰ تراکتید در آن بلوک است.

اندازه‌گیری زاویه میکروفیبریل‌های لایه S_2

برای اندازه‌گیری زاویه میکروفیبریل تراکتیدها، روش «ترک‌دهی دیواره تراکتید» بکار گرفته شد [۱۹]. این شیوه مبتنی بر گسترش فضاهای بین فیبریلی موجود در دیواره دومین (دیواره S_2) تراکتید است. فضاهای بین فیبریلی را می‌توان با خشک کردن بلوک‌های کوچک چوبی در دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد گسترش داد. هم‌کشیدگی سریع و تنش‌های خشک‌شدگی بالا باعث می‌شود که دیواره سلولی و به‌خصوص لایه ضخیم S_2 در جهت میکروفیبریل‌هایش ترک بردارد. رنگ‌آمیزی بعدی، دیدن این ترک‌ها را زیر میکروسکوپ نوری راحت‌تر می‌کند. زاویه‌ای که این ترک‌های کوچک با محور طولی سلول ایجاد می‌کنند در واقع همان زاویه میکروفیبریل‌ها است.

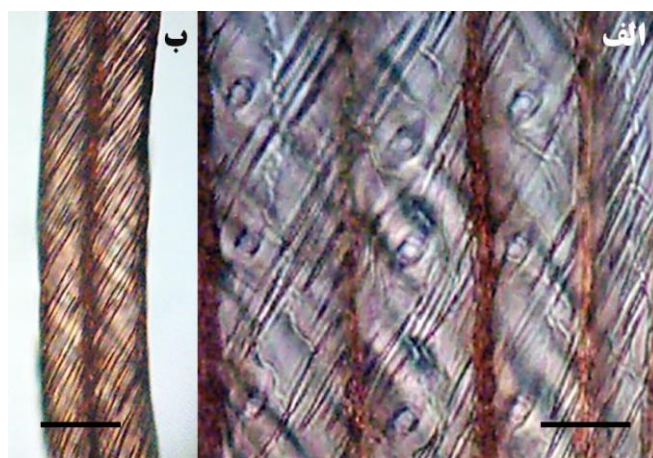
نوع تیمار استفاده‌شده در این پژوهش برای ترک‌دهی دیواره تراکتیدها، نسخه ساده‌شده‌ای از تیمار پیشنهادی Wang و همکاران (۲۰۰۱) است [۲۰]. در این شیوه، پس از تهیه خلال‌هایی به ضخامت چوب‌کبریت از بلوک‌های چوبی و خشک (در دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد برای ۱-۲ ساعت) و تر کردن (غوطه‌وری در آب برای ۱-۲

اندازه‌گیری طول تراکتید

برای اندازه‌گیری طول تراکتیدها از روش Franklin (۱۹۴۵) استفاده شد [۱۸]. ابتدا توسط چکش و مغار خلال‌های باریکی به ضخامت چوب‌کبریت از بلوک‌های چوبی تهیه شد. این خلال‌ها را درون لوله‌آزمایش قرار داده و سپس به نسبت ۱:۱ اسید استیک و آب‌اکسیژنه به آن‌ها اضافه شد؛ به نحوی که نمونه‌ها در داخل محلول کاملاً غوطه‌ور شدند. پس از برجسب‌زنی، لوله‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون کوره (اون) با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از خروج از کوره و آبشویی توسط آب مقطر، نمونه‌های چوبی سفید شده درون یک بشر قرار گرفته و با کمک مگنت آزمایشگاهی، الیاف وابری شدند. پس از وابری کامل الیاف، چند قطره سافرانین ۲/۵٪ محلول در آب درون بشر ریخته شد تا الیاف رنگ بگیرند. پس از رنگ‌آمیزی، به کمک قطره‌چکان مقداری الیاف روی لام ریخته و سپس لامل به‌گونه‌ای روی آن گذاشته شد که حباب تشکیل نشود. لام‌ها زیر میکروسکوپ پروژکتوردار با بزرگ‌نمایی ۳۶ برابر گذاشته شده و با استفاده از منحنی سنج (کرویمتر)، طول تراکتیدهایی که تصویرشان روی پرده افتاده بودند اندازه‌گیری گردید. از هر بلوک چوبی دستکم ۱۰ لام تهیه و در هر لام، طول ۵ تا ۱۰ تراکتید اندازه‌گیری شد. به‌عبارت‌دیگر، طول

در هر دو لام، زاویه میکرو فیبریل ۲۰ تراکئید اندازه گیری شد. اگر متوسط زاویه میکرو فیبریل تراکئیدها در هر دو لام یکسان بود؛ تعداد تراکئیدهایی که باید برای حصول به نتایج قابل اطمینان اندازه گیری کرد ۲۰ خواهد بود. در غیر این صورت این کار با اندازه گیری ۳۰ تراکئید در هر دو لام و مقایسه دوباره این دو تکرار می شود. این کار آن قدر ادامه می یابد تا میانگین زاویه میکرو فیبریل اندازه گیری شده در هر دو لام یکسان شود. با استفاده از این روش مشخص شد که لازم است در هر بلوک زاویه میکرو فیبریل ۳۰ تراکئید اندازه گیری شود. در این پژوهش سعی شد اندازه گیری ها از دیواره شعاعی و در یک منطقه ثابت تراکئید (وسط آن) انجام شود. پس از انتقال عکس ها به رایانه، با کمک نرم افزار فتوشاپ زاویه ای که ترک ها با محور طولی تراکئید می سازند اندازه گرفته شد (شکل ۲). این زاویه همان زاویه میکرو فیبریل های لایه S_۲ است [۱۹ و ۳].

ساعت) متناوب، آن ها را به مدت ۲۴ ساعت در محلول ۱:۱ آب اکسیژنه و اسید استیک قرار داده و بقیه مراحل وابری مانند آنچه در اندازه گیری طول تراکئید شرح داده شد، صورت پذیرفت. با این تفاوت که در حین وابری شدن با مگنت، نمونه ها جوشانده شدند تا گسترش ترک ها راحت تر انجام گیرد و همچنین پیش از وابری شدن کامل الیاف، به هم زدن سوسپانسیون الیاف متوقف شد. با این کار، مجموعه هایی از سه تا ده تراکئید به هم چسبیده به وجود آمد. عمده این دسته تراکئیدها، در راستای شعاعی به هم چسبیده بودند و از این رو، اندازه گیری ها به دیواره شعاعی منحصر شد. پس از وابری شدن نسبی، الیاف با سافرانین ۲/۵٪ محلول در آب رنگ آمیزی شده و پس از تثبیت روی لام، زیر میکروسکوپ نوری Nikon عکس برداری انجام گرفت. برای تعیین تعداد تراکئیدهایی که می بایست در هر بلوک بررسی شوند از شیوه پیشنهادی Donaldson (۱۹۹۱) استفاده شد [۲۱]: از هر بلوک، به طور تصادفی دو لام محتوی تراکئیدها تهیه شده و



شکل ۲- ترک های موجود روی دیواره تراکئیدهای چوب مقابل فشاری (الف) و فشاری (ب) سرو سیمین. زاویه این ترک ها با محور طولی سلول معرف زاویه میکرو فیبریل لایه S_۲ است. خط مقیاس در شکل الف و ب، به ترتیب ۳۰ و ۴۰ میکرومتر است

این آزمون علاوه بر اثر مستقل فاصله از مغز و نوع چوب بر ویژگی های آناتومی، اثر متقابل این دو نیز بررسی شد. برای درک ارتباط بین طول و زاویه میکرو فیبریل تراکئیدها، ضریب همبستگی پیرسون^۳ بین این دو متغیر -به تفکیک هر چوب- محاسبه شد. در صورت معنی دار بودن همبستگی، بهترین خط برازش کننده این ارتباط (نوع رگرسیون) تعیین شد. در پایان، برای راستی آزمایی

آزمون های آماری

از نرمال بودن توزیع داده ها برای هر متغیر با آزمون شپیرو-ویلک^۱ اطمینان حاصل آمد. سپس، معنی دار بودن اثر فاصله از مغز و نوع چوب (فشاری یا مقابل فشاری) بر روی میانگین طول و زاویه میکرو فیبریل تراکئیدها با آزمون تحلیل واریانس دوطرفه^۲ مورد بررسی قرار گرفت. با

³ Pearson

¹ Shapiro-Wilk

² Two way ANOVA

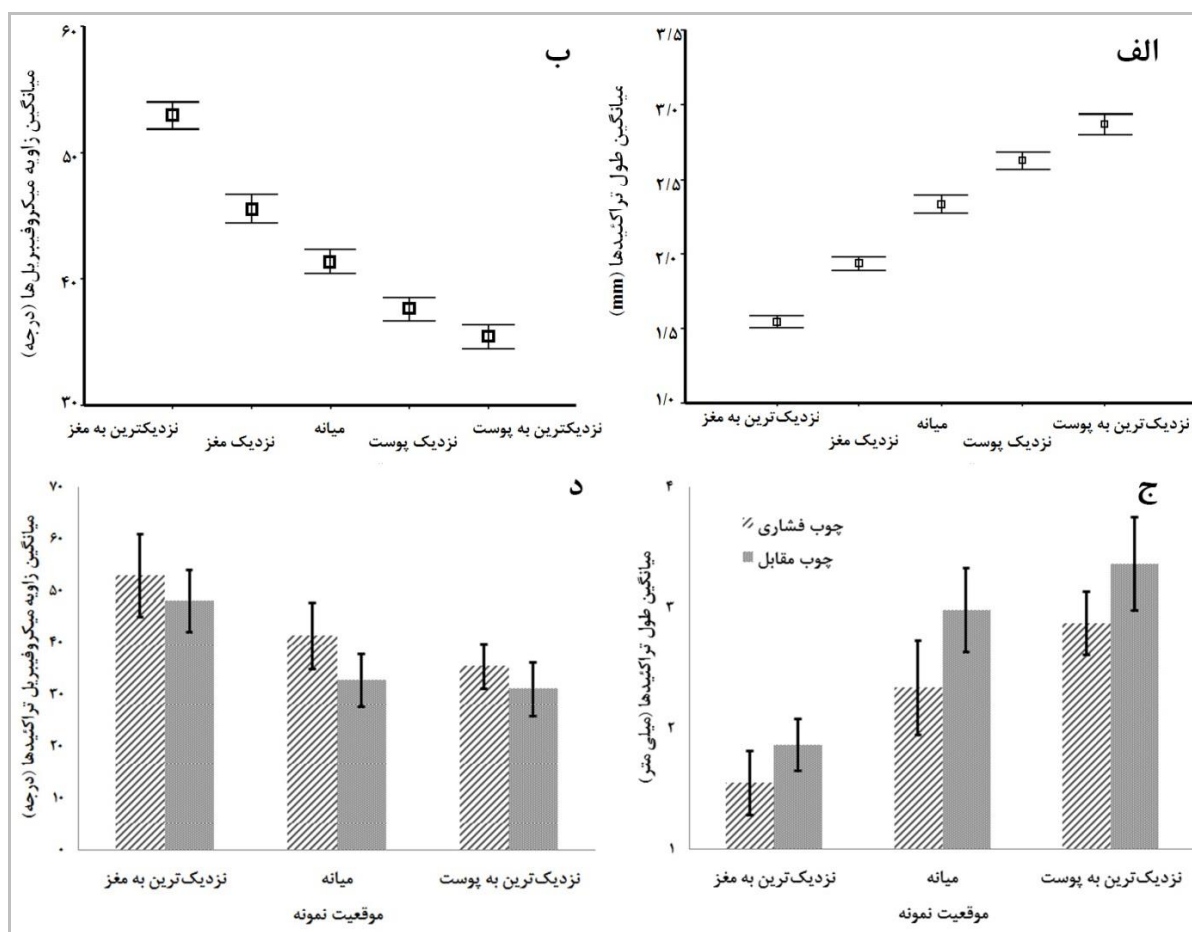
و (د). نوع چوب (فشاری یا مقابل فشاری بودن) نیز تأثیر معنی‌داری از نظر آماری بر هر دو ویژگی آناتومی مورد بررسی داشته ($p < 0.05$) به طوری که طول تراکئیدها در نمونه‌های فشاری کوتاه‌تر (شکل ۳-ج) و زاویه میکروفیبریل آن‌ها بیشتر (شکل ۳-د) از نمونه‌های متناظر مقابل فشاری بودند. اثر متقابل فاصله از مغز و نوع چوب بر میانگین دو ویژگی مورد بررسی در سطح ۵٪ معنی‌دار نبوده است؛ بدین مفهوم که شدت تغییرات طول یا زاویه میکروفیبریل تراکئیدها از مغز به پوست در هر دو منطقه فشاری و مقابل فشاری یکسان است و فشاری بودن چوب تأثیری بر روی الگوی تغییرات دو ویژگی مورد بررسی نداشته است.

معادله پرستون (معادله ۱)، کتانژانت زاویه میکروفیبریل‌ها بر روی طول تراکئیدها پلات شدند. تمامی آزمون‌های آماری با نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

تغییر ویژگی‌های آناتومی در راستای عرضی درخت و اختلاف چوب فشاری و مقابل فشاری

آزمون‌های آماری نشان دادند که اثر فاصله از مغز بر روی میانگین طول تراکئیدها و زاویه میکروفیبریل آن‌ها در هر دو چوب فشاری و مقابل فشاری در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده است. طول تراکئیدها از مغز به سمت پوست افزایش یافته (شکل ۳-الف و ج) در حالی که میانگین زاویه میکروفیبریل‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۳-ب



شکل ۳- تغییرات طول (الف) و زاویه میکروفیبریل تراکئیدها (ب) از مغز به پوست در قسمت فشاری و مقایسه متوسط طول تراکئیدها (ج) زاویه میکروفیبریل آن‌ها (د) در چوب فشاری و مقابل فشاری

با دور شدن از مغز متوسط طول تراکئیدها افزایش می‌یابد [۲۲]. این افزایش ابتدا شدید بوده و با نزدیک

همچون یافته‌های بیشتر پژوهشگران، در این پژوهش نیز معلوم شد که در هر دو منطقه فشاری و مقابل فشاری

هم در قسمت فشاری و هم در قسمت مقابل فشاری همبستگی مستحکم و منفی‌ای بین طول تراکئید و زاویه میکروفیبریل نمونه‌ها یافت شد ($r = -0.89$ فشاری، $r = -0.91$ - مقابل فشاری $r = 0.87$ - کل) که این همبستگی‌ها در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نمودار پراکنش داده‌های این دو متغیر را در دو محور عمود برهم در دو قسمت فشاری و مقابل فشاری نشان می‌دهد و شکل ۴-ج نشانگر رابطه بین این دو متغیر صرف‌نظر از نوع چوب است. با بررسی آماری مشخص شد که بهترین تابع برازش کننده در قسمت فشاری و مقابل فشاری، به ترتیب از نوع لگاریتمی و خطی بود و در حالتی که اگر همه داده‌ها صرف‌نظر از نوع چوب در نظر گرفته شود، رابطه از نوع نمایی بهترین برازش را داشت (جدول ۲). با پلات کردن کتانژانت زاویه میکروفیبریل‌ها بر روی طول تراکئید در قسمت فشاری و در حالت کلی (مجموع چوب فشاری و مقابل فشاری) یک رابطه خطی بین آن دو دیده شد (شکل ۴-د). باین‌حال در قسمت مقابل فشاری این حالت دیده نشد. بهترین معادله‌ی معرف رابطه طول و زاویه میکروفیبریل‌های لایه S₂ در چوب فشاری به‌قرار زیر محاسبه شد:

$$L = -0.01 + 2.02 \times \cot \alpha \quad (2)$$

این رابطه در حالت کلی (بدون در نظر گرفتن نوع چوب) به‌قرار زیر محاسبه شد:

$$L = 0.09 + 1.97 \times \cot \alpha \quad (3)$$

که در آن α میانگین زاویه میکروفیبریل‌های لایه S₂ و L میانگین طول تراکئیدها به میلی‌متر است. Rsq رگرسیون معادله اخیر ۰/۹۶۱ بوده که در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است ($F = 740$). ارائه رابطه برای چوب مقابل فشاری به‌طور مستقل به دلیل کم بودن داده‌ها در این قسمت امکان‌پذیر نبود.

شدن به پوست از شدت آن کاسته می‌شود. باین‌حال برخلاف نظر Yoshizawa و همکاران (۱۹۸۷) [۲۳]، تفاوت معنی‌داری بین شدت افزایش طول تراکئیدها در دو منطقه فشاری و مقابل فشاری یافت نشد. بنا به نظر این دانشمندان، شدت تغییرات طول تراکئیدها در جهت عرضی در چوب فشاری کمتر و نامنظم‌تر از چوب مقابل فشاری است. درحالی‌که در این پژوهش، روند این تغییرات در هر دو منطقه مشابه هم بود. البته ذکر این نکته لازم است که نوع نمونه‌برداری در این پژوهش متفاوت از تحقیقات مذکور بود. بدین‌صورت که هر نمونه موردبررسی در این تحقیق حاوی ۷-۳ حلقه‌ی رویشی بوده، درحالی‌که هر نمونه پژوهش مذکور تنها از یک حلقه رویشی یا قسمتی از آن (مثلاً چوب پایان آن) تشکیل شده بود. از این‌رو می‌توان این‌گونه فرض کرد که هر داده مورد استناد در این پژوهش میانگینی از چند داده پژوهش مذکور بوده و این میانگین‌گیری تا حدی شدت تغییرات را پوشانده است. کوتاه‌تر بودن طول تراکئیدهای فشاری در مقایسه با چوب مقابل ناشی از افزایش شدت تقسیمات پریکلینالی کامبیوم در قسمت فشاری است [۲۳].

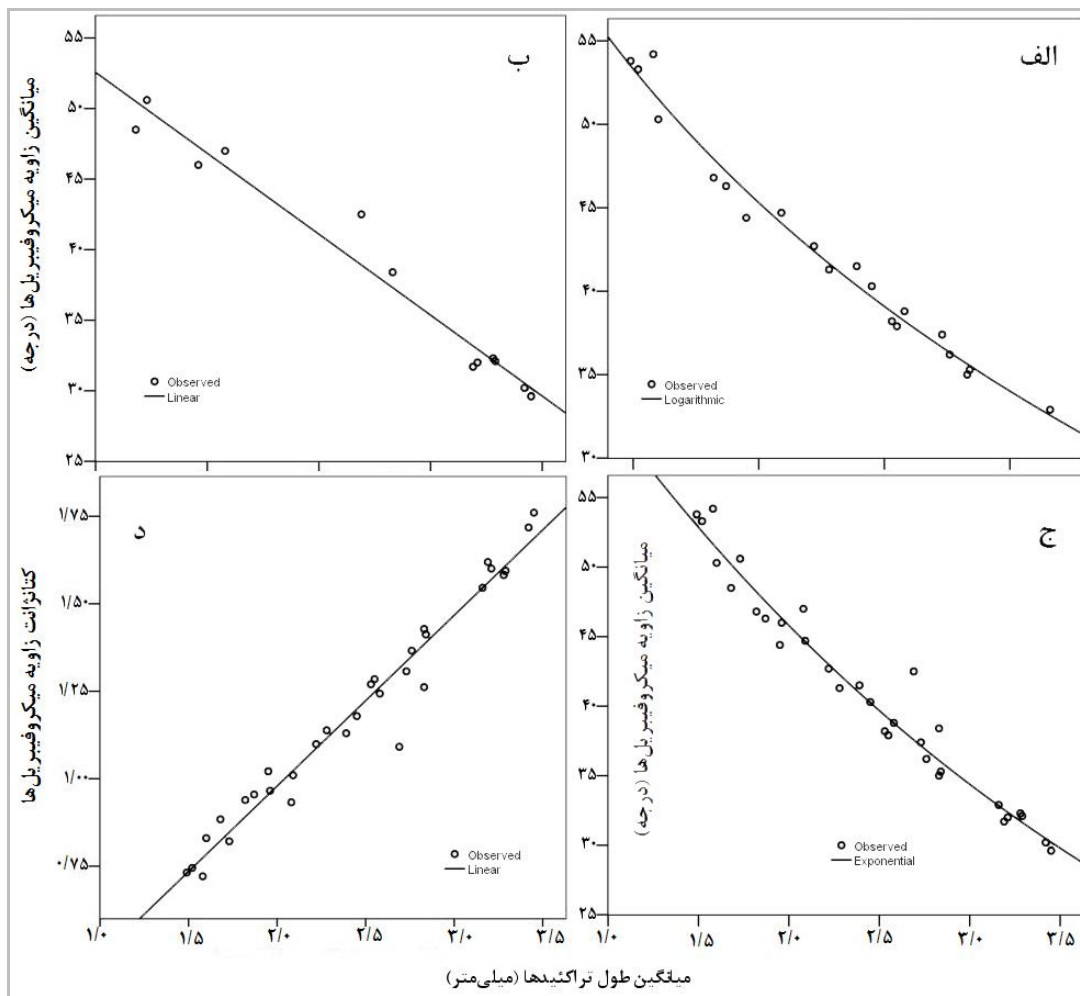
الگوی تغییرات زاویه میکروفیبریل لایه S₂ در جهت عرضی تا حد زیادی عکس روند تغییرات طول تراکئیدها در این راستا است. در هر دو منطقه فشاری و مقابل فشاری و از مغز به پوست زاویه میکروفیبریل لایه S₂ تراکئیدها کاهش یافت. نتیجه‌ای که در بسیاری از تحقیقات پیشین از جمله [۷ و ۸] نیز اعلام شده بود. این کاهش ابتدا شدید بوده و به‌تدریج از مقدار آن کاسته می‌شود. زیاد بودن شدت تغییرات زاویه میکروفیبریل و طول تراکئید بین نمونه‌های درونی‌تر و کاهش این شدت بین نمونه‌های بیرونی‌تر را می‌توان به جوان‌چوبی بودن نمونه‌های نزدیک‌تر به مغز نسبت داد. شدت تغییرات ویژگی‌های آناتومی چوب در جوان‌چوب و یا از جوان‌چوب به بالغ‌چوب شدید بوده درحالی‌که در بالغ‌چوب از دامنه این تغییرات کاسته می‌شود [۷ و ۲۲].

ارتباط بین طول تراکئید و زاویه میکروفیبریل

لایه S₂

جدول ۲- بهترین نوع رگرسیون بین میانگین طول و زاویه میکروفیبریل تراکئیدها در چوب فشاری و مقابل فشاری سرو سیمین و شاخص‌های کیفیت برازش

F	ضریب تعیین (R^2)	نوع رابطه	نوع چوب
۸۷۲	۰/۹۸	لگاریتمی	فشاری
۲۷۳	۰/۹۶	خطی	مقابل فشاری
۷۹۳	۰/۹۶	نمایی	حالت کلی (فشاری و مقابل فشاری)



شکل ۴- رابطه بین میانگین طول و زاویه میکروفیبریل تراکئیدها در چوب فشاری (الف)، مقابل فشاری (ب) و حالت کلی (ج). در شکل (د)، کتانژانت زاویه میکروفیبریل‌ها بر روی طول تراکئیدها پلات شده است

تعیین زاویه میکروفیبریل مؤثر باشند [۲۲]. پیش‌ازاین نشان داده شده است که در یک درخت سوزنی‌برگ، طول تراکئید نقش اصلی را در تعیین زاویه نهایی میکروفیبریل‌ها بازی می‌کنند؛ به‌نحوی که اگر دو تراکئید چوب فشاری و نرمال طولی یکسان داشته باشند، زاویه میکروفیبریل لایه S_۲ آن‌ها نیز یکی خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر زاویه میکروفیبریل‌های لایه S_۲ یک تراکئید

Preston (۱۹۴۸) یکی از نخستین پژوهشگرانی بود که اظهار داشت زاویه نشست فیبریل‌ها در سلول به طول حفره‌ی سلول بستگی دارد. او استدلال کرد که در زمان تشکیل چوب، در حفره‌های سلولی باریک و بلند شرایط برای قرار گرفتن لایه‌ها با زاویه اندک مهیاتر است؛ درحالی‌که در حفره‌های سلولی پهن و کوتاه، لیاف با زاویه زیاد روی‌هم‌قرار می‌گیرند [۱۰]. نه‌فقط طول سلول بلکه ابعاد و شکل کلی حفره سلولی نیز ممکن است در

اثبات وجود رابطه پرستون ممکن است به این مسئله یا به طور کلی به شیوه‌های متفاوت اندازه‌گیری این زاویه برگردد [۱۴].

نتیجه‌گیری

با آنکه در این پژوهش، رابطه غیرخطی بین میانگین طول و زاویه میکروفیبریل‌های تراکئیدها و صحت رابطه پرستون به اثبات رسید ولی توجیه دقیق چرایی این رابطه تاکنون بیشتر در حد فرضیات آزمون نشده باقی مانده است. از این رو بررسی ارتباط طول و نحوه استقرار میکروفیبریل‌ها در حین تشکیل چوب با شیوه‌های نوین [۲۴] می‌تواند به فهم این رابطه از نظر زیستی کمک کند.

متأثر از طول تراکئید است و فشاری یا مقابل فشاری بودن آن تأثیری بر این ویژگی ندارد [۱۳].

نتایج پژوهش کنونی نشان داد که رابطه‌ی بین میانگین طول و زاویه میکروفیبریل تراکئیدها از نوع غیرخطی است. خطی بودن این رابطه در چوب مقابل فشاری احتمالاً به خاطر کم بودن تعداد جفت داده‌ها در این بخش بوده است. علاوه بر این، به طور کلی می‌توان گفت که بین طول و زاویه میکروفیبریل تراکئیدهای گونه مورد آزمایش رابطه پرستون صادق است. باید دقت داشت که معادله پرستون را می‌توان رابطه‌ای تجربی و خاص دانست که تنها برای میانگینی از تعداد زیادی تراکئید صادق است و در مورد سلول‌های منفرد مصداق پیدا نمی‌کند [۲]. تلاش‌های ناموفق برخی پژوهشگران برای

منابع

- [1] Tarmian, A., Faezipour, M., Karimi, A.N. and Parsapajouh, D., 2008. The heterogeneity in physical properties of wood in spruce trees (*Picea abies*) containing compression wood. Pajouhesh & Sazandegi, 78:158-166. (In Persian).
- [2] Timell, T.E., 1986. Compression wood in gymnosperms. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, Germany, 625 p.
- [3] Fathi, L., Bahmani, M., Saadatnia, M.A., Poursartip, L., 2017. An investigation on anatomical and mechanical properties of vascular bundles in Date palm (case study: Ahvaz countryside). Iranian Journal of wood and paper industries, 8(1):109-118. (In Persian).
- [4] Courchene, C.E., Peter, G.F. and Litvay, J., 2006. Cellulose microfibril angle as a determinant of paper strength and hygroexpansivity in *Pinus taeda* L. Wood and Fiber Science, 38(1): 112-120.
- [5] Zobel, B.J. and van Buijtenen, J.P., 1989. Wood variation: its causes and control. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, Germany, 363 p.
- [6] Sheng-zuo, F., Wen-zhong, Y. and Xiang-xiang, F., 2004. Variation of microfibril angle and its correlation to wood properties in poplars. Journal of Forestry Research, 15(4): 261-267.
- [7] Chiu, C.M., Lin, C.J. and Wang, S.Y., 2005. Tracheid length and microfibril angle of young *Taiwania* grown under different thinning and pruning treatments. Wood and Fiber Science, 37(3): 437-444.
- [8] Mansfield, S.D., Parish, R., Ott, P.K., Hart, J.F. and Goudie, J.W., 2016. Assessing the wood quality of interior spruce (*Picea glauca* × *P. engelmannii*): Variation in strength, relative density, microfibril angle, and fiber length. Holzforschung, 70(3): 223-234.
- [9] Bergander, A., Brändström, J., Daniel, G. and Sahren, L., 2002. Fibril angle variability in earlywood of Norway spruce using soft rot cavities and polarization confocal microscopy. Journal of Wood Science, 48(4): 255-263.
- [10] Preston, R.D., 1948. The fine structure of the wall of the conifer tracheid III. Dimensional relationships in the central layer of the secondary wall. Biochimica et Biophysica Acta, 2: 370-383.

- [11] Preston, R.D. and Wardrop, A.B., 1949. The fine structure of the wall of the conifer tracheid IV. Dimensional relationships in the outer layer of the secondary wall. *Biochimica et Biophysica Acta*, 3: 585-592.
- [12] Preston, R.D., 1988. Cellulose-microfibril-orienting mechanisms in plant cells walls. *Planta*, 174(1): 67-74.
- [13] Wardrop, A.B. and Dadswell, H.E., 1950. The nature of reaction wood II. The cell wall organization of compression wood tracheids. *Australian Journal of Biological Sciences*, 3(1): 1-13.
- [14] Barnett, J.R. and Bonham, V.A., 2004. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 79(2): 461-472.
- [15] Echols, R.M., 1955. Linear relation of fibrillar angle to tracheid length, and genetic control of tracheid length in slash pine. *Tropical Woods*, 102: 11-12.
- [16] Lin, C.-J. and Chiu, C.-M., 2007. Relationships among selected wood properties of 20-year-old *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*) trees. *Journal of Wood Science*, 53(1): 61-66.
- [17] Kibblewhite, R.P., Evans, R., Grace, J.C. and Riddell, M.J.C., 2005. Fibre length, microfibril angle and wood colour variation and interrelationships for two radiata pine trees with mild and severe compression wood. *Appita Journal*, 58(4): 316-322.
- [18] Franklin, G.L., 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and woody-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature*, 155: 51-51.
- [19] Oladi, R., Parsapajouh, D. and Pourtahmasi, K., 2009. A comparison between three methods of measuring microfibril angle in compression and opposite wood of *Cupressus arizonica*. *Journal of Forest and Wood Products (JFWP)*. *Iranian Journal of Natural Resources*, 62(1): 21-33 (In Persian).
- [20] Wang, H.H., Drummond, J.G., Reath, S.M., Hunt, K. and Watson, P.A., 2001. An improved fibril angle measurement method for wood fibres. *Wood Science and Technology*, 34(6): 493-503.
- [21] Donaldson, L.A., 1991. The use of pit apertures as windows to measure microfibril angle in chemical pulp fibres. *Wood and Fiber Science*, 23(2): 290-295.
- [22] Lachenbruch, B., Moore, J.R. and Evans, R., 2011. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence, in: Meinzer, F.C., Lachenbruch, B., Dawson, T.E. (Eds.), *Size- and age-related changes in tree structure and function*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 121-164.
- [23] Yoshizawa, N., Kiyomiya, M. and Idei, T., 1987. Variations in tracheid length and morphological changes in tracheid tips associated with the development of compression wood. *Wood Science and Technology*, 21(1): 1-10.
- [24] Clair, B., Alm eras, T., Pilate, G., Jullien, D., Sugiyama, J. and Riekkel, C., 2011. Maturation stress generation in poplar tension wood studied by synchrotron radiation microdiffraction. *Plant Physiology*, 155(1): 562-570.

Verifying the Preston equation between the average of tracheid length and microfibril angle in *Cupressus arizonica* compression and opposite wood

Abstract

In a conifer, an increase in tracheid length is usually accompanied with a decrease in microfibril angle of S₂ layer (MFA). Preston proposed an equation relating these two features, quantitatively. However, this equation has less been verified in subsequent works. Hence, in this study, variation of tracheid length and MFA from pith to bark in compression and opposite wood of *Cupressus arizonica* was investigated and it was tried to determine the relationship between these two factors, quantitatively. Results showed that the tracheids are shorter and mean MFA is bigger in compression than opposite wood. Moreover, in both sides, mean tracheid length increased from pith to bark while MFA decreased in the same direction. A strong and negative relation was found between the mean tracheid length and MFA in both areas which was of nonlinear type when compression, and compression and opposite wood together were concerned. Overall, Preston equation between these two anatomical features was verified.

Keywords: reaction wood, microfibril angle, tracheid length, method of “inducing cracks on cell wall”, wood anatomy.

R. Oladi^{1*}
K. Pourtahmasi²
D. Parsapajouh³

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

² Professor, Department of wood and paper science & technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Professor, Department of wood and paper science & technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
oladi@ut.ac.ir

Received: 2016/11/30
Accepted: 2016/02/12