

بررسی خواص بیومکانیکی کاج سیاه با استفاده از تکنیک امواج تنشی و رسیستوگرافی

تنا لطفی^{۱*}، محمدعلی سعادت‌نیا^۲، محمدهادی مرادیان^۲ و لادن پورسرتیپ^۲

*۱- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران،
پست الکترونیک: s_lotfiii@yahoo.com

۲- استادیار، گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران.

تاریخ دریافت: آذر ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۰

چکیده

اطمینان از کیفیت و پایداری درختان، توجه متخصصان جنگل را برای شناسایی و اندازه‌گیری معایب و اطمینان از ضرایب ایمنی درختان سرپا به خود جلب کرده است. از این رو در این تحقیق استفاده از توموگرافی آکوستیکی امواج تنشی برای محاسبه وسعت پوسیدگی، مساحت ناحیه چوب‌فشاری و تعیین ضریب ایمنی در کاج سیاه مطالعه شد. توموگرافی آکوستیکی با استفاده از ۱۶ سنسور در دو ارتفاع ۱۴۷ و ۲۰۰ سانتی‌متری از سطح زمین و بر روی ۸ نمونه درخت در ناحیه شوپرون مجارستان انجام شد. نتایج نشان داد که تکنیک امواج تنشی، روشی دقیق برای تعیین ضرایب ایمنی و تعیین میزان پوسیدگی‌های درونی درخت بوده و همچنین قابلیت شناسایی نواحی چوب‌فشاری را در مقطع عرضی داشته است. رسیستوگرافی مقاطع مورد مطالعه در جهات مختلف جغرافیایی به مکان‌یابی دقیق نواحی چوب‌فشاری کمک کرده که این امر با اطلاعات مربوط به توموگرام آکوستیکی همخوانی داشت. یافته‌های این تحقیق نشان داد که مساحت تاج، نقش بسزایی در ایمنی درخت و احتمال سقوط درخت داشته، به طوری که در بعضی از درختان با توجه به وضعیت‌شان، با دو برابر شدن مساحت تاج، میزان گشتاور از ۸۰۸۲۷ به مقدار ۱۶۱۶۵۵ N.m رسید و وضعیت درخت از حالت کم‌خطر به پرخطر تغییر یافت.

واژه‌های کلیدی: چوب‌فشاری، توموگرافی آکوستیکی، امواج تنشی، رسیستوگرافی.

مقدمه

در دنیای امروز درختان سرمایه‌های ارزشمندی از نظر منافع اقتصادی، اکولوژیکی، زیباسازی و اجتماعی هستند. اهمیت ویژه درختان سرپا باعث شده، اطمینان از پایداری و کیفیت چوب درخت به‌عنوان دغدغه اصلی برای متخصصان حوزه جنگل و چوب باشد. به‌طور اساسی ارزیابی کیفیت چوب، در مورد درختان با هدف استفاده از آن برای مصارف و فراوری‌های مختلف از جمله تولید خمیرکاغذ، تخته خرده چوب، تخته فیبر و روکش‌های طبیعی مطرح است. همچنین

ارزیابی پایداری درختان برای اطمینان از مقاوم بودن آنها در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی حائز اهمیت است (Kazemi-najafi, 2016). معمولاً افزایش سن درختان باعث ایجاد معایب داخلی در آنها از قبیل پوسیدگی، ایجاد حفره‌های گردگسیختگی، ترک‌ها و ... می‌گردد. از سوی دیگر وجود عوامل محیطی مانند تندبادها، بارش برف و باران سبب تضعیف پایداری درخت می‌شود. بنابراین شکسته شدن و سقوط درخت ناشی از افت مقاومت‌های مکانیکی و ساختاری اهمیت پایداری درختان را در رابطه با ایمنی آنها روشن

می‌کند

(Liang et al., 2012). در ارزیابی درختان سرپا، باید به ضریب ایمنی درختانی که دارای تاج وسیع هستند توجه کرد. اغلب تصور می‌شود که سقوط درخت فقط به دلیل گسترش پوسیدگی، وزش بادهای شدید و یا بارهای ناشی از برف اتفاق می‌افتد، اما امکان سقوط درخت در هوای آرام نیز وجود دارد. این مسئله در مورد درختانی که در زمین شیب‌دار رشد کرده‌اند و یا دارای تاج بزرگ نامتقارن هستند، نیز صدق می‌کند. معمولاً عوامل مختلف پیچیده با اثرهای متقابل باعث گسترش مراکز تنش و وقوع شکست در قسمت‌های حاوی پوسیدگی درونی شده و این امر باعث می‌شود تا تنه درخت تحمل بار خارجی اعمال شده و به‌ویژه وزن تاج گسترده را نداشتند

(Kazemi-najafi, 2016). از این‌رو بهتر است برای جلوگیری از آسیب‌های جانی و مالی به‌ویژه در مناطق مسکونی، درختان از نظر ضریب ایمنی ارزیابی و معایب داخلی آنها شناسایی شود. گرچه برای ارزیابی درختان از دیرباز، بازرسی چشمی انجام می‌شده، ولی این نوع بررسی اطلاعات مفیدی را در ارتباط با پایداری و کیفیت درخت ارائه نمی‌دهد (Wang et al., 2007). امروزه توجه به ارزیابی‌های غیرمخرب به‌منظور بررسی شرایط درونی درخت مورد توجه محققان قرار گرفته است. مسئله بسیار مهم در استفاده از این روش‌ها عدم وارد کردن لطمه به سلامت درختان، سهولت در انجام ارزیابی و استفاده از وسایل قابل حمل می‌باشد. توموگرافی آکوستیکی^۱ روشی غیرمخرب، پرکاربرد و رایجی است که با انتشار امواج تنشی در داخل ماده و اندازه‌گیری زمان انتقال و محاسبه سرعت موج منتشر شده تصویری از وضعیت داخلی ماده ایجاد می‌کند. به علت هزینه‌های کم و غیرتهاجمی بودن روش مذکور، امروزه برای بررسی توان ایستایی درختان سرپا، شناسایی نقایص ساختار داخلی، تشخیص پوسیدگی، مناطق توخالی، حفره‌ها، ترک‌ها، تعیین ضریب ایمنی، تشخیص خطر سقوط و شناسایی نواحی چوب

واکنشی^۲ درخت مورد استفاده قرار گرفته است (Brancheriu et al., 2012; Du et al., 2015; Johnstone et al., 2010; Li et al., 2012; Ostrovský et al., 2017; Roohnia et al., 2017; Schubert et al., 2009) اساس کار توموگرافی آکوستیکی تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب است، به طوری که معمولاً انتشار موج در داخل یک ماده چوبی پوسیده به کندی انجام می‌شود. سرعت انتقال موج در درختان نرمال و درختانی که دارای معایب هستند متفاوت است، همین موضوع سبب ایجاد الگوهای رنگی متفاوت در توموگرام حاصل از این روش می‌گردد و از این طریق با تمایز نواحی معیوب به شناسایی آنها کمک می‌کند. چوب‌های واکنشی در اثر تنش‌های مختلف رشد در درختان سرپا تشکیل شده و از معایب طبیعی درخت به حساب می‌آیند. این عیب اکثراً در درختانی به وجود می‌آید که در زمین‌های شیب‌دار رشد کرده و یا در معرض بادهای دائمی یک‌طرفه قرار دارند و معمولاً تشکیل آنها تحت تأثیر تحریکات هورمونی می‌باشد. چوب‌های کششی و فشاری به دلیل تغییر زاویه میکروفیبریل در لایه S₂ دارای سرعت موج بیشتری بوده و در توموگرام‌ها به‌صورت نواحی سبز تیره با سرعت موج بیشتری نشان داده می‌شوند (Barnett & Jeronimidis, 2003). روش رسیستوگرافی^۳ یک روش غیرمخرب دیگری است که به دلیل ارزان بودن و سرعت عمل انجام عملیات و قابلیت حمل و نقل دستگاه مورد توجه قرار گرفته است. دستگاه رسیستوگراف مانند یک دستگاه متزن عمل کرده و با ایجاد یک سوراخ کوچک با قطر کمتر از ۱ میلی‌متر در درخت، سختی و مقاومت آن را نسبت به نفوذ مته می‌سنجد. چوب فشاری به دلیل تراکم ساختار و افزایش دانسیته در برابر نفوذ مته رسیستوگراف مقاومت کرده و از این طریق نسبت به چوب نرمال متمایز می‌گردد (Fundova et al., 2018). عدم توانایی در تشخیص پوسیدگی در مراحل اولیه و همچنین عدم تمایز برخی معایب درونی درخت به دلیل شباهت تصویرها از محدودیت‌های

2 -Reaction wood

3 -Resistography

1 - Acoustic tomography

سیاه یک گونه تجاری مهم با گستردگی وسیع می‌باشد. این پژوهش در نظر دارد تا با استفاده از تکنیک توموگرافی آکوستیکی بر روی گونه کاج سیاه، میزان پوسیدگی، شناسایی نواحی چوب‌فشاری، تعیین ضریب ایمنی درخت و اثر مساحت‌های مختلف تاج بر پایداری آن را در توموگرام حاصل بررسی کند. سپس برای اطمینان و مکان یابی دقیق ناحیه فشاری و تفسیر بهتر نتایج داده‌های حاصل را با روش رسیستوگرافی مورد صحت‌سنجی قرار دهد.

توموگرافی آکوستیکی به شمار می‌رود (Goncz et al., 2017; Bieker et al., 2010). از آنجاکه چوب درختان یک ماده ارتوتروپیک و کاملاً پیچیده می‌باشد، نخست داشتن اطلاعات دقیق در مورد آناتومی چوب گونه مورد بررسی کمک شایانی به یک نتیجه‌گیری خوب می‌کند. از سوی دیگر برای غلبه بر این محدودیت‌ها و کاهش میزان خطا در نتایج نهایی روش مکملی همانند رسیستوگرافی پیشنهاد می‌گردد. به طوری‌که بخش وسیعی از جنگل‌های اروپا و آمریکا از گونه‌های درختی سوزنی‌برگ تشکیل شده است. در این میان گونه کاج



(ب)



(الف)



(د)



(ع)

شکل ۱- اجزای مختلف دستگاه توموگرافی امواج تنشی، الف: سنسور پیزوالکتریک، ب: کابل‌های رابط، ج: آمپلی‌فایر، د: باتری

توموگرافی آکوستیکی

برای تهیه تصاویر توموگرام آکوستیکی، از دستگاه توموگرافی امواج تنشی ساخت شرکت فاکوپ^۲ استفاده شد. این دستگاه دارای ۱۶ سنسور از جنس پیزوالکتریک، آمپلی‌فایرها، باتری، کابل‌های رابط، چکش مخصوص و یک نرم‌افزار رایانه‌ای بود (شکل ۱).

مواد و روش‌ها

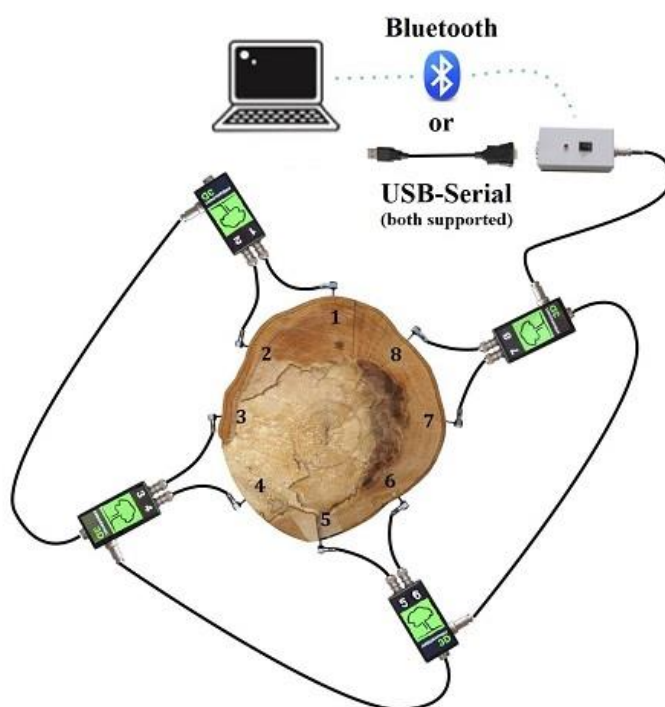
در این تحقیق تعداد ۸ درخت کاج سیاه (*pinus nigra*) از منطقه شوپرون^۱ واقع در کشور مجارستان انتخاب گردید. پس از ارزیابی کیفی از نظر عدم وجود معایب ظاهری، در دو ارتفاع ۱۴۷ و ۲۰۰ سانتی‌متر از سطح زمین اسکن مقاطع به منظور تهیه توموگرام آکوستیکی انجام شد.

2- (<https://www.fakopp.com/en/product/arborsonic>)

1- Sopron

سوزن سنسور در ناحیه پوست، سیگنال سالم به دست نخواهد آمد. قبل از شروع کار از درست بودن موقعیت الکترودها و اطمینان از اتصال آنها به آمپلی فایرها مطابق با شکل ۲، همچنین اتصال کابل‌های رابط جانبی به آمپلی-فایرها و بعد اتصال به جعبه باتری و در آخر اتصال جعبه باتری به رایانه توسط یک کابل رابط اطمینان حاصل شد.

به منظور انجام آزمون آکوستیکی بر روی درخت در هر یک از مقاطع مورد مطالعه، در ابتدا اولین الکترودها در جهت جغرافیایی شمال بر روی تنه درخت نصب شد. سپس با اندازه‌گیری قطر درخت و تقسیم آن به ۱۶ فاصله مساوی، سایر الکترودها بر روی محیط درخت نصب گردید. از نفوذ الکترودها به داخل ناحیه چوب‌برون اطمینان حاصل شد تا درصد خطا کاهش پیدا کند. زیرا در صورت قرار گرفتن



شکل ۲- نحوه اتصال دستگاه توموگرافی امواج تنشی

باشد برنامه قابلیت محاسبه سرعت را ندارد. تعداد ضربه‌های وارد شده به هر سنسور ۵ ضربه بود. با اندازه‌گیری زمان دریافت موج و با توجه به فاصله سنسورها، سرعت بین سنسورها و پس از پردازش سیگنال‌ها درصد پوسیدگی، ضریب ایمنی، میزان گشتاور و ... محاسبه شد. جزئیات هر یک از توموگرام‌های حاصل، با استفاده از نرم‌افزار *Image j* مورد مطالعه قرار گرفت و مساحت چوب‌فشاری (ناحیه تیره رنگی که دارای سرعت صوت بالایی بود)

پس از اطمینان از اتصال صحیح دستگاه و آماده بودن سیستم برای شروع کار، ابتدا نرم‌افزار برنامه باز و بعد مشخصات مربوط به قطر درخت و ضخامت پوست را وارد برنامه کرده و گونه مورد نظر از لیست موجود در برنامه انتخاب شد. در ادامه با یک چکش مخصوص به سنسورها ضربه وارد شد. هر ضربه باعث ایجاد یک موج تنشی در درخت شده و این موج به صورت سیگنال توسط سایر سنسورها دریافت گردید. اگر تعداد ضربه‌ها کمتر از ۳ عدد

سوزن دستگاه به طول ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۱ میلی‌متر بود که با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه داخل ساختار چوب نفوذ می‌کند. در هریک از مقاطع مورد مطالعه و در چهار جهت جغرافیایی با توجه به موقعیت نواحی تیره رنگ و پرسرعت در توموگرام آکوستیکی، رسیستوگرافی انجام شد و مقاومت درخت در برابر نفوذ مته بررسی شد.

نتایج

توموگرافی آکوستیکی

نتایج حاصل از اسکن مقاطع عرضی درختان کاج سیاه در شکل ۳ نشان داده شده است. درخت شماره ۱، ۲، ۶ و ۸ دارای پوسیدگی جزئی و درختان ۳، ۴ و ۷ تقریباً فاقد پوسیدگی در مقاطع عرضی بودند.

برآورد شد. همچنین یادآوری می‌شود که میانگین سرعت باد در شهر شوپرون ۳۳ m/s بود و طبق فرمول زیر میزان نیروی وارد بر درخت محاسبه گردید.

$$F_w = 1/2(LV^2A)$$

نیروی باد $f_w : N$

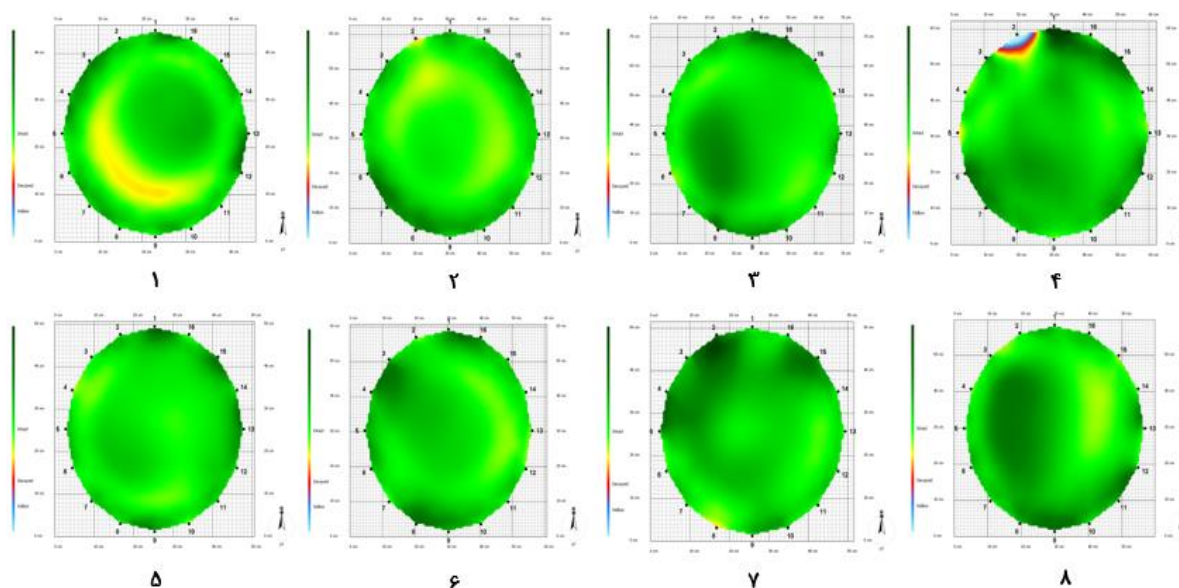
دانسیته هوا $L : 1/2 \text{ kg}/m^3$

سرعت باد $V : m/s$

مساحت سطح $A : m^2$

رسیستوگرافی

به منظور اطمینان از درستی ارزیابی توموگرافی آکوستیکی از دستگاه رسیستوگرافی مدل 4453-P شرکت رینتک استفاده شد. این دستگاه روش مناسبی برای شناسایی دقیق چوب‌فشاری می‌باشد. شایان ذکر است که



شکل ۳- توموگرام آکوستیکی مقاطع اسکن شده درختان کاج سیاه

است. البته اگر شدت پوسیدگی افزایش یابد زمان انتشار موج بین سنسورها افزایش و تغییر رنگ به سمت قرمز و در حالت حفره به رنگ آبی ارغوانی تغییر می‌یابد. اما در

در نواحی پوسیدگی جزئی، سرعت موج تنشی کمتر بوده و نسبت به نواحی سالم و بدون عیب با رنگ زرد نشان داده شده‌اند که به وضوح در توموگرام شماره ۱ قابل مشاهده

جدول ۱ میانگین سرعت موج در نواحی مختلف درختان مورد آزمون آورده شده است.

توموگرام‌ها نواحی تیره سیاه رنگی نیز مشاهده می‌شود. این نواحی دارای سرعت موج بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها بوده و به راحتی در توموگرام‌ها قابل تشخیص است. در

جدول ۱- میانگین سرعت موج تنشی در نواحی مختلف مقطع عرضی درختان

شماره درخت	ناحیه پوسیده (جزئی) (m/s)	ناحیه سالم (سبز روشن) (m/s)	ناحیه فشاری (سبز تیره) (m/s)
۱	۱۳۰۰-۱۴۲۰	۱۴۳۰-۱۶۵۰	۱۶۷۰-۱۹۵۰
۲	۱۰۷۰-۱۴۱۰	۱۴۲۰-۱۶۵۰	۱۷۰۵-۲۱۵۰
۳	۱۴۲۵-۱۴۶۵	۱۴۸۰-۱۸۰۸	۱۸۳۰-۲۰۱۱
۴	۶۰۸-۱۳۳۰	۱۳۶۷-۱۶۷۰	۱۷۰۰-۳۰۰۰
۵	۱۳۱۳-۱۳۷۳	۱۴۱۰-۱۶۴۰	۱۶۸۰-۱۹۳۴
۶	۱۴۶۰-۱۴۷۲	۱۴۸۳-۱۶۲۰	۱۶۵۰-۲۰۳۰
۷	۱۲۷۰-۱۳۷۸	۱۳۹۲-۱۵۹۰	۱۶۰۰-۲۱۸۳
۸	۱۳۸۰-۱۴۲۰	۱۴۳۰-۱۶۹۰	۱۷۰۰-۱۹۴۶

به بیشترین مقدار خود (۴۵ درصد) رسیده است. در جدول ۲ نواحی حاوی چوب فشاری محاسبه شده است.

بر اساس آنچه در جدول ۱ نشان داده شده، در نواحی پوسیده سرعت موج نسبت به نواحی سبز روشن ۱۵ درصد کاهش را نشان داده و این کاهش نسبت به نواحی سبز تیره

جدول ۲- محاسبه مساحت و درصد ناحیه حاوی چوب فشاری

شماره درخت	میزان انحراف درخت از خط راست	مساحت کل مقطع (cm^2)	مساحت ناحیه واکنشی (m^2)	درصد چوب فشاری (%)
۱	۲	۱۴۰۶/۳۰۸	۱۲۶/۶۶۳	۹/۰۰۶
۲	۲	۲۶۸۵/۷۰۶	۲۳۰/۹۱۸	۸/۵۹۸
۳	۳۶	۳۴۶۱/۵۹۷	۵۶۶/۷۲۷	۱۶/۳۷۱
۴	۱	۲۵۶۶/۵۲۶	۲۹۴/۲۷۶	۱۱/۴۶۵
۵	۲۳	۱۷۹۰/۴۵۵	۱۷۳/۲۸۷	۹/۶۷۸
۶	۱	۲۲۶۶/۷۸۹	۲۲۴/۰۲۳	۹/۸۸۲
۷	۱۹	۱۷۸۵/۰۴۱	۲۹۴/۳۵۷	۱۶/۴۹۰
۸	۱۹	۲۳۱۱/۶۴۹	۵۹۰/۶۶۴	۲۵/۵۵۱

محدود می‌کند، از این رو برآورد میزان آن در درخت اهمیت دارد و بهترین راهبرد این است که نواحی حاوی چوب- فشاری تشخیص و در کاربرد نهایی از چوب نرمال جدا شوند. داده‌های حاصل از ارزیابی‌های بیومکانیکی درختان کاج سیاه به‌طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده و مطابق با جدول استاندارد (۴)، ضریب ایمنی آنها تعیین شده است.

با توجه به آنچه در جدول ۲ آورده شده، درختان ۸، ۷ و ۳ با بیشترین مساحت ناحیه واکنشی شده، بیشترین درصد چوب فشاری را داشته‌اند. میانگین سرعت انتشار موج در نواحی فشاری ۱۹۲۱ m/s است، درحالی‌که مقدار آن در ناحیه نرمال ۱۵۴۵ m/s ثبت شد. از آنجاکه نواحی چوب- فشاری به‌عنوان یک عیب بیولوژیکی، کاربرد نهایی چوب را

جدول ۳- داده‌های حاصل از ارزیابی بیومکانیکی درختان مورد مطالعه

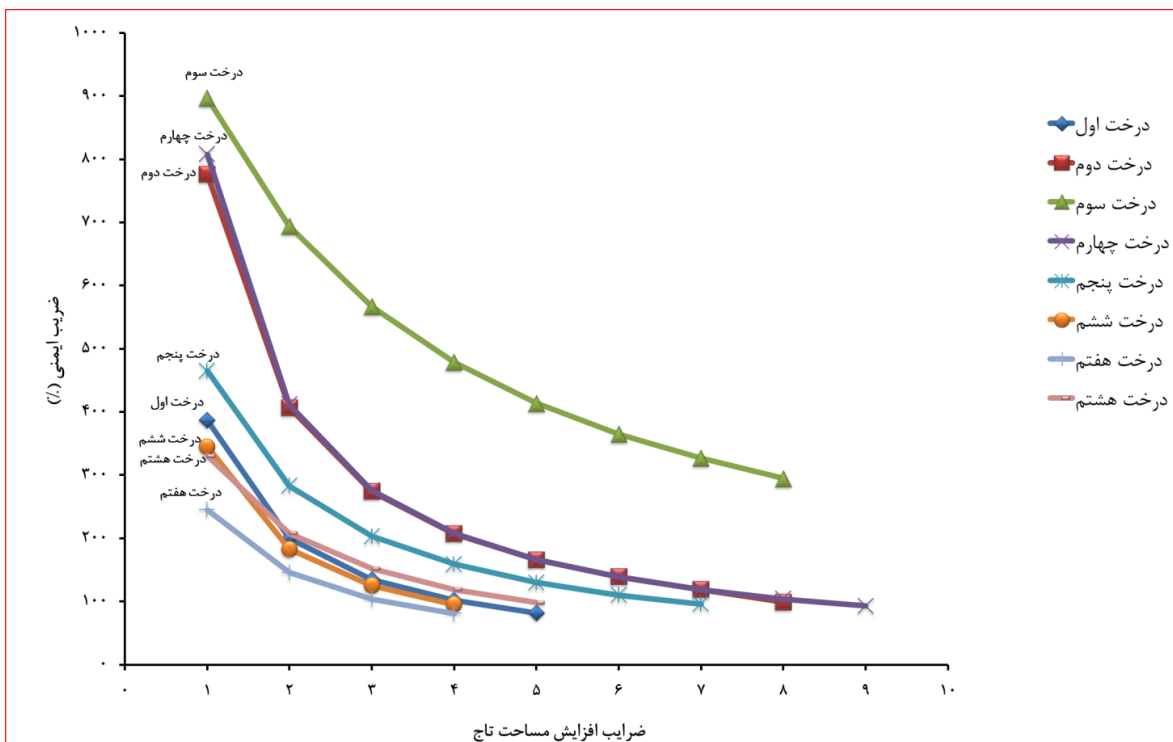
شماره درخت	میانگین قطر (cm)	مساحت تاج (m^2)	نیروی باد (N)	وزن بالای سطح (kg)	میزان گشتاور (N.m)	درصد پوسیدگی	ضریب ایمنی (%)	وضعیت درخت
۱	۴۷	۴۸/۴	۵۸۸۵	۱۴۷۲	۶۰۶۸۴	۳	۳۸۷	کم خطر
۲	۶۲	۵۲/۹	۶۴۲۵	۲۳۵۰	۶۳۳۵۷	۱	۷۷۶	کم خطر
۳	۷۹	۳۲/۹	۳۹۹۳	۲۰۱۷	۲۵۱۷۶	۰	۸۹۷	کم خطر
۴	۶۶	۵۶/۵	۶۸۶۲	۲۲۵۴	۶۴۸۶۰	۲	۸۰۸	کم خطر
۵	۵۸	۴۶	۵۵۹۵	۱۱۵۷	۴۵۷۴۷	۰	۴۶۵	کم خطر
۶	۶۲	۷۰/۲	۸۵۳۳	۲۳۷۲	۱۰۳۹۸۳	۰	۳۴۵	کم خطر
۷	۵۴	۷۴/۱	۹۰۰۵	۱۵۲۲	۸۰۸۲۷	۰	۲۴۵	کم خطر
۸	۶۲	۵۴/۷	۶۶۴۸	۲۲۵۵	۷۶۶۴۷	۰	۳۳۰	کم خطر

جدول ۴- ضرایب ایمنی استاندارد در دستگاه آربورسونیک

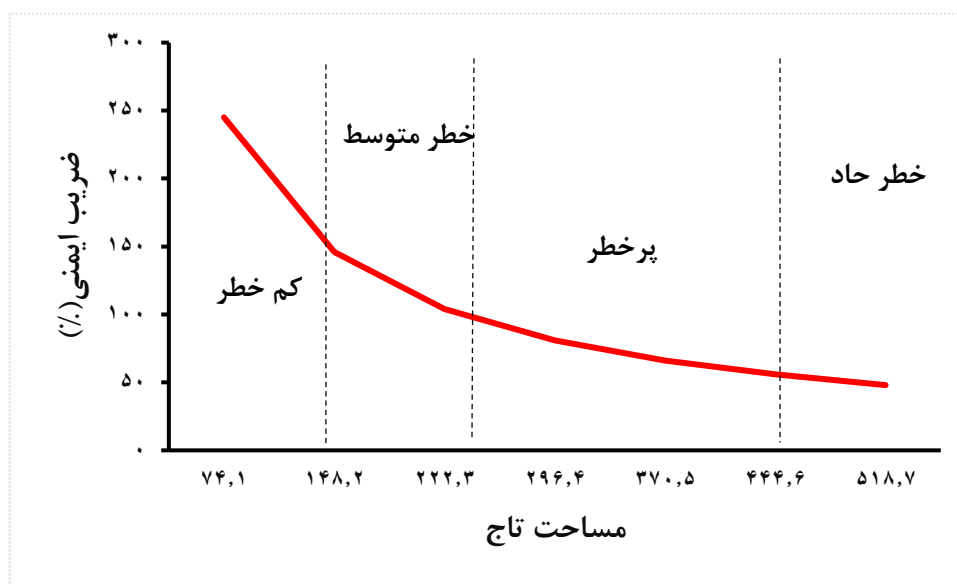
ضریب ایمنی	کمتر از ۵۰٪	۵۰٪ - ۱۰۰٪	۱۰۰٪ - ۱۵۰٪	بیشتر از ۱۵۰٪
میزان خطر	خطر حاد	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر

به‌موقع انجام نشود امکان خطر افتادن درخت افزایش خواهد یافت. نمودار شکل ۴ رابطه بین وضعیت ضریب ایمنی درخت و مساحت تاج درختان را نشان می‌دهد.

با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۳، خطری درختان را تهدید نمی‌کند. البته ضریب ایمنی درختان با توجه به مساحت تاج درختان در وضعیت کنونی بوده اما اگر مساحت تاج درختان بیشتر شود و هرس مناسب و



شکل ۴- رابطه بین ضریب ایمنی و مساحت‌های مختلف تاج در درختان مورد مطالعه



شکل ۵- تأثیر مساحت تاج (m^2) بر ضریب ایمنی در درخت شماره ۷

پرخاطر تبدیل کند. این مسئله اهمیت هرس درختان را به‌ویژه در نقاط بد آب‌وهوا (دارای طوفان شدید، بادهای یک‌طرفه، پریبارش) نشان می‌دهد. زیرا با افزایش مساحت تاج درختان

همان‌طور که به‌وضوح در نمودار شکل ۴ نشان داده شده، مساحت بیشتر تاج درخت با توجه به وزن زیاد آن می‌تواند وضعیت درخت را از حالت نرمال و ایمن به یک وضعیت

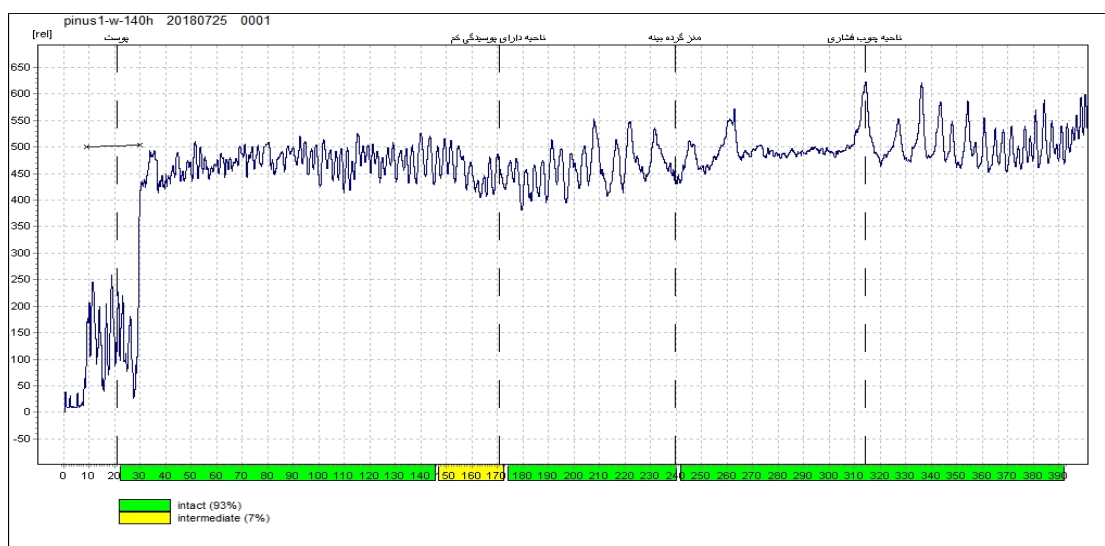
شماره ۳ مشاهده می‌شود دانسیته چوب آغاز 433 kg/m^3 و دانسیته چوب پایان 548 kg/m^3 اندازه گیری شد. در نمونه مورد مطالعه همچنین مقاومت چوب فشاری نسبت به نفوذ مته ۶۱۵-۷۱۳ rel و مقاومت ناحیه چوب نرمال ۴۶۴-۵۳۲ rel اندازه‌گیری گردید.

نمودارهای حاصل از رسیستوگرافی نشان داد که بین نواحی پوسیده و نقاط حاوی چوب فشاری از نظر مقاومت به نفوذ مته اختلاف معنی‌داری وجود داشته است. با توجه به پیک‌های به دست آمده مقاومت به رسیستوگرافی در محدوده که دچار پوسیدگی جزئی بوده تا حدودی افت پیدا کرده است، اما در نقاط حاوی چوب فشاری مقاومت‌ها روند صعودی با شیب تند داشته‌اند. مشاهدات حکایت از انطباق منحنی‌ها با توموگرام‌های آکوستیکی داشت، به این معنی که ناحیه فشاری که در توموگرام‌ها وجود داشته است به خوبی در منحنی حاصل از رسیستوگرافی قابل تشخیص بودند.

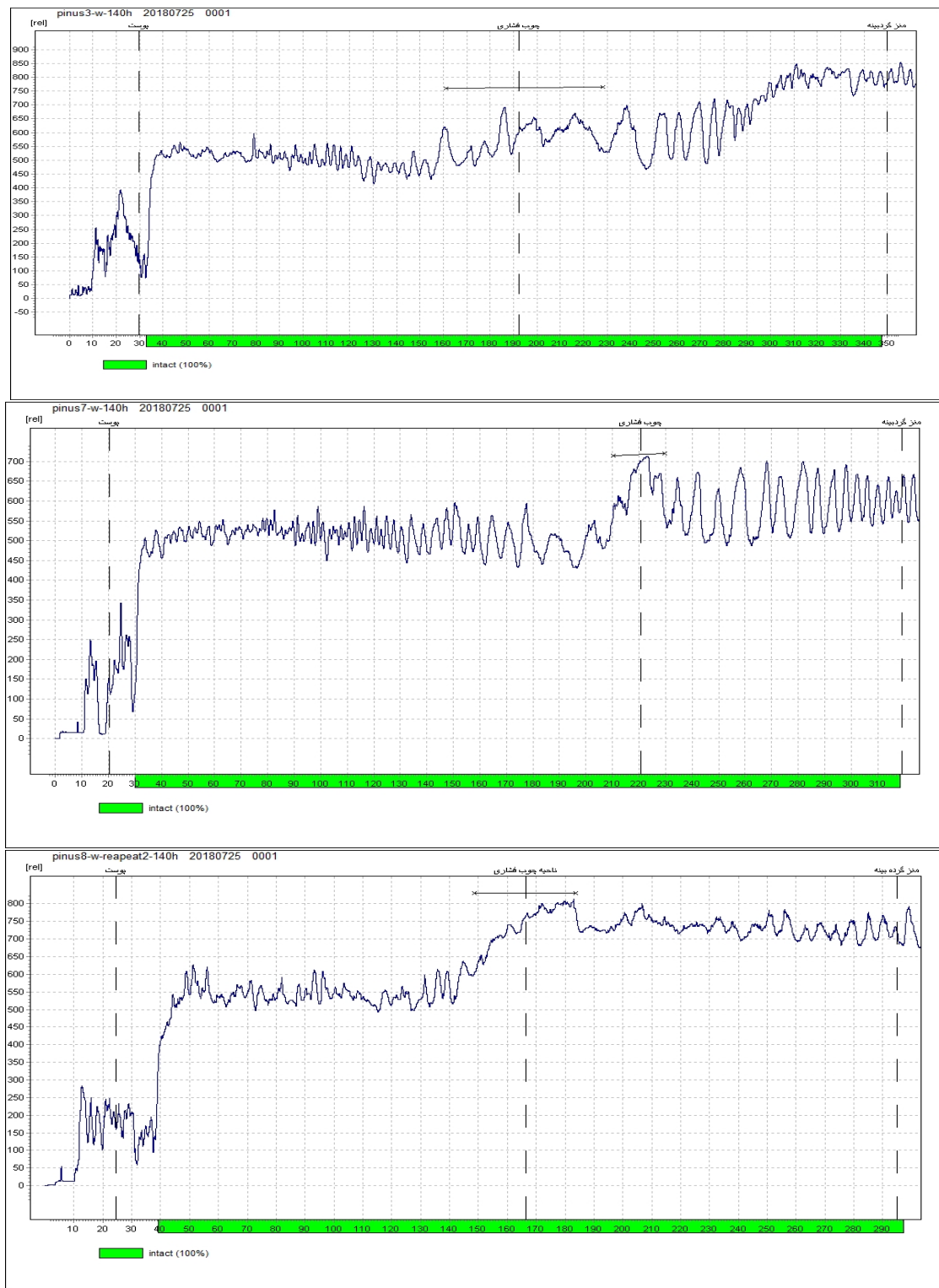
میزان گشتاور حاصل از نیروی باد به شدت افزایش یافته و این امر منجر به افزایش تنش وارده به درخت می‌شود. به عنوان مثال در درخت شماره ۷، اگر مساحت تاج چهار برابر شود، میزان گشتاور از 58750 N.m به 241216 N.m و میزان تنش بیشینه از $4/59$ به $17/92$ مگاپاسکال افزایش یافته که این امر وضعیت درخت را از کم‌خطر به پرخطر تبدیل می‌کند (شکل ۵). از این رو درختانی که دارای نواحی پوسیدگی درونی می‌باشند از نواحی مذکور آسیب‌پذیرتر بوده و اگر میزان تنش وارده بیش از تحمل درخت باشد دچار شکستگی خواهند شد.

رسیستوگرافی

به منظور مکان‌یابی دقیق نواحی چوب فشاری در مقاطع مورد مطالعه ۱۴۷ و ۲۰۰ سانتی‌متر، رسیستوگرافی در ۴ جهت جغرافیایی انجام شد. با توجه به وضعیت مقاطع نمونه‌های آزمونی، ۴ موردی که بیشترین همگرایی را با توموگرام‌های آکوستیکی داشتند در نمودارهای شکل ۶ آورده شده است. به عنوان مثال همان‌طور که در کاج



شکل ۶- رسیستوگراف به دست آمده از درختان ۱، ۳، ۷ و ۸



ادامه شکل ۶- رسیستوگراف به دست آمده از درختان ۱، ۳، ۷ و ۸

بحث

از نتایج ارائه شده می‌توان دریافت که عیب‌یابی درونی درختان توسط توموگرافی آکوستیکی به روش امواج تنشی امکان‌پذیر بوده و قادر به شناسایی نواحی با پوسیدگی جزئی می‌باشد. این تصاویر برای درخت‌شناسان اطلاعات قابل قبولی در ارتباط با سلامت درخت، تعیین ضریب ایمنی و احتمال خطر سقوط درخت ارائه می‌کند. قدرت بالای توموگرافی آکوستیکی در تعیین ضریب ایمنی و تشخیص معایب درونی در مطالعات محققان مشاهده شده است (Ostrovsky et al., 2017; Liang & fu et al., 2012; Schubert et al., 2009). در تحلیل این رفتار باید گفت انتشار امواج تنشی در چوب یک فرایند پیچیده دینامیکی و متأثر از جهت‌گیری الیاف چوب است. در اثر وارد کردن ضربه به تنه درخت، موج تنشی که در واقع مخلوطی از موج طولی (با بیشترین سرعت)، موج عرضی و سطحی است، ایجاد شده و پارامترهای آن شامل زمان انتقال، سرعت موج و میرایی آن تغییر می‌کنند (Nia et al., 2012). محاسبه زمان عبور موج اطلاعاتی را در زمینه خواص مکانیکی و فیزیکی چوب و معایب آنها آشکار می‌کند. در درختان سرپا که حاوی پوسیدگی بودند، با کاهش مدول الاستیسیته، سرعت موج کاهش و میرایی افزایش پیدا کرد (kasal et al., 2011). این امر باعث شد تا توموگرام‌ها با توجه به شدت پوسیدگی در نواحی مذکور به رنگ زرد از سایر بخش‌ها متمایز شوند. همچنین این تحقیق نشان داد که توموگرافی آکوستیکی می‌تواند برای تعیین مکان و وسعت چوب فشاری مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات Brancheriau و همکاران (۲۰۱۲) و Saadatnia و همکاران (۲۰۱۱) و Bucur و Chivers (۱۹۹۱) و Bucur (۲۰۱۰) همخوانی دارد. مکان‌یابی دقیق نواحی مذکور با رسیستوگرافی، یک ساختار متراکم در داخل درخت را نشان داد که در آن دانسیته چوب به شدت افزایش پیدا کرده بود. این نشانه‌ها و وضعیت انحنای درختان وجود چوب فشاری را به وضوح ثابت می‌کند. تحقیقات نیز نشان داده است که در نواحی چوب فشاری، تغییر در زاویه

میکرو فیبریل و افزایش مدول الاستیسیته حاصل از تغییرات ناگهانی دانسیته چوب، سرعت موج را به شدت افزایش می‌دهد. درختان شماره ۳، ۷ و ۸ تقریباً ۲۰ درجه نسبت به خط قائم در یک مورد بیشتر از مقدار مذکور انحنای داشتند. این وضعیت احتمال تشکیل چوب فشاری را در نواحی مذکور افزایش داد.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که وجود معایب پنهان در درختان سرپا امری متداول است، در این پژوهش روش‌های ارزیابی غیرمخرب توموگرافی امواج تنشی و رسیستوگرافی به منظور بررسی وضعیت درونی درخت مورد استفاده قرار گرفت. رسیستوگرافی به عنوان روشی مکمل قابلیت کاهش خطای روش‌های آکوستیکی را دارد. به ویژه در مکان‌یابی نواحی واکنشی، تراکم ساختاری چوب فشاری باعث ایجاد پیک در رسیستوگراف شده و به شناسایی آن کمک می‌کند. اگرچه پس از قطع درخت و کاهش رطوبت، نواحی فشاری تبدیل به قسمت ضعیفی از چوب شده که به علت داشتن رفتارهای کاملاً متفاوت نسبت به چوب نرمال سبب ایجاد ناهمگنی در ساختار چوب می‌شود (Green et al., 1999). این تحقیق همچنین قابلیت بالای اثر گستردگی تاج درخت را در افزایش احتمال سقوط درخت نشان داد.

منابع مورد استفاده

- Barnnet j.R., and Jeronimidis, G., 2003. Wood Quality and Its Biological Basis. Blackwell Scientific Publisher, Oxford, 226p.
- Bieker, D. and Rust, S., 2010. Non-destructive estimation of sapwood and heartwood width in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silva Fennica*, 44(2): 267-273.
- Brancheriau, L., Saadat-Nia, M.A., Gallet, P., Lasaygues, P., Pourtahmasi, K. and Kaftandjian, V., 2012. Ultrasonic imaging of reaction wood in standing trees. *Acoustical Imaging*, Springer, 31(5): 399-411.
- Bucur, V., and Chivers, R.C., 1991. Acoustic properties and anisotropy of some Australian wood species. *Acta Acustica United with Acustica*, 75(1): 69-74.

- Li, L., Wang, X., Wang, L. and Allison, R.B., 2012. Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness mappings. *Wood Science and Technology*, 46(1-3): 551-561.
- Liang, S. and Fu, F., 2012. Strength loss and hazard assessment of Euphrates poplar using stress wave tomography. *Wood and Fiber Science*, 44(1): 54-62.
- Nia, M.A.S., Enayati, A.A., Brancheriau, L. and Pourtamasi, K., 2012. Investigation the acoustic behavior of poplar and spruce species reaction wood using ultrasonic technique. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 27(2): 306-318.
- Ostrovský, R., Kobza, M. and Gažo, J., 2017. Extensively damaged trees tested with acoustic tomography considering tree stability in urban greenery. *Springer*, 31(3): 1015-1023.
- Roozhnia, M., Jahan latibari, A., Behzad, B., Zarrinmehr, J., Kohantorabi, M., Manouchehri, N. and Tajdini, A., 2017. Development of tomographic technology (case study: trees from Karaj city). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 33(1): 100-111.
- Saadat Nia, M.A., Brancheriau, L., Enayati, A.K., Pourtamasi, K. and Honarvar, F., 2011. Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood. *Bioresources*, 6(2): 1172-1185.
- Schubert, S., Gsell, D., Dual, J., Motavalli, M. and Niemz, P., 2009. Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforschung*, 63(1): 107-112.
- Wang, X., Allison, R.B., Wang, L. and Ross, R.J., 2007. Acoustic tomography for decay detection in red oak trees. *Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*. 642: 1-7.
- Bucur, V., 2006. *Acoustic of Wood*. Springer Series in Wood Science, 387p.
- Bucur, V., 2010. Acoustic tomography for tension wood detection in eucalypts: 255-268. In: Bucur, V., (Eds.). *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Springer, Heidelberg, 401p.
- Du, X., Li, S., Li, G., Feng, H. and Chen, S., 2015. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation. *BioResources*, 10(3): 3948-3962.
- Fundova, I., Funda, T. and Wu, H.X., 2018. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PloS One*, 13(9): 1-16.
- Goncz, B., Divos, F. and Bejo, L., 2017. Detecting the presence of red heart in beech (*Fagus sylvatica*) using electrical voltage and resistance measurements. *Springer*, 76(2): 679-686.
- Green D., Winandy J. and kretschmann D., 1999. Mechanical properties of wood: 100-146. In: *Department of Agriculture., (Eds.). Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Forest Service, United States, 509p.
- Johnstone, D., Moore, G., Tausz, M. and Nicolas, M., 2010. The measurement of wood decay in landscape trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(3): 121-127.
- Kasal, B., Lear, G. and Tannert, T., 2011. Stress Waves: 5-24. In: kasal, B. and Tannert, T., (Eds.). *In Situ Assessment of Structural Timber*. Springer, Berlin, 123p.
- Kazemi-najafi, S., 2016. *Nondestructive evaluation of standing trees*. Tarbiat modares university press, Tehran, 436p.

Investigation on biomechanical properties of *Pinus nigra* Using stress wave technique and resistography

S. Lotfi^{1*}, M.A. Saadatian², M.H. Moradian² and L. Poursartip²

1*-Corresponding author, MSc. in Dept. of Cellulose Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran, E-mail: s_lotfiii@yahoo.com

2-Assistant Prof., Dept. of Cellulose Technology Engineering, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Received: Dec., 2020 Accepted: April, 2021

Abstract

Ensuring the quality and stability of trees as the most important components of the plant community has attracted the attention of foresters to identify and measure defects and ensure safety coefficients. Therefore, in the present study, the use of acoustic tomography to calculate the extent of decay, the area of the woody section and the safety factor of black pine was studied. Acoustic tomography was performed using 16 sensors at two elevations of 147 and 200 cm above the ground and on 8 tree in the Sopron region of Hungary. The results showed that the stress wave technique was an accurate method for determining safety coefficients and determining the amount of internal decay in the tree and also had the ability to identify compression areas in cross section. Resistography of the studied sections in different geographical directions assisted to locating the woody areas, which was compatible with the information of acoustic tomography. The findings of this study showed that the area of the canopy has a significant role in the safety of the tree and the possibility of tree fall, so that in some trees due to their condition, with doubling the area of the canopy, the torque increased from 80827 to 161655 N.m and the condition of the tree changed from low-risk to high-risk.

Keywords: Compression wood, Acoustic tomography, Stress wave, Resistography.