

## ارزیابی معایب داخلی و پوسیدگی چوب‌های قدیمی ساختمانی با استفاده از روش غیرمخرب رادار نفوذی زمین (GPR)

محراب مدهوشی<sup>۱\*</sup> و حمید هاتف‌نیا<sup>۲</sup>

\*<sup>۱</sup>- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، پست الکترونیک: madhoushi@gau.ac.ir  
<sup>۲</sup>- دکترای فراورده‌های چوب، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۱

### چکیده

در این مطالعه، از رادار نفوذی زمین (GPR) برای ارزیابی معایب داخلی و پوسیدگی چوب‌های ساختمانی قدیمی و مقایسه آن با چوب‌های سالم استفاده شد. برای این منظور، از سه گونه راش، بلوط و سرخدار نمونه‌هایی به ابعاد ۱۲۰ × ۶۰ × ۴۰ میلی‌متر با الگوی برش مماسی انتخاب گردید. از گونه راش دو نمونه با پوسیدگی شدید و از گونه بلوط دو نمونه با پوسیدگی خفیف از ساختمان‌های چوبی قدیمی انتخاب شد. همچنین، از هریک از این گونه‌ها دو نمونه سالم و کاملاً خشک از درختان جنگلی هر کدام به‌عنوان شاخص تهیه گردید. نمونه‌های سرخدار فقط از ساختمان قدیمی و فاقد پوسیدگی به تعداد چهار عدد انتخاب شد. با استفاده از دریل، حفره‌های مصنوعی به قطر ۲ و ۸ میلی‌متر در نمونه‌های دارای پوسیدگی و همچنین در دو نمونه از نمونه‌های سرخدار ایجاد شد. نمونه‌ها با استفاده از آنتن با فرکانس بالا ۲/۳ گیگاهرتز و در جهت عمود بر الیاف اسکن شدند. شرایط داده‌برداری و پردازش برای همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. بعد از داده‌برداری اولیه، برای افزایش وضوح و تفسیر بهتر تصویر، فیلتراسیون‌های مختلف به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر Reflexw اعمال گردید. نتایج نشان داد، مقدار ضریب دی‌الکتریک نسبی در چوب‌های پوسیده بزرگ‌تر بود. با توجه به اختلاف ضریب بازتابش، چوب‌های سالم و پوسیده شناسایی و تفکیک شدند. همچنین، حفره‌های با قطر ۸ میلی‌متر در گونه‌های بلوط و سرخدار قابل تشخیص بود.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، پوسیدگی، چوب ساختمانی قدیمی، رادار نفوذی زمین

### مقدمه

ساختار ماده در سطوح میکروسکوپی و ماکروسکوپی به‌صورت موفقیت‌آمیز استفاده شدند. در همین راستا، ناپیوستگی‌های سطحی، لایه‌ای شدن (پدیده تورق)، ترک‌ها، سوراخ‌ها و تغییرات دانسیته به‌وسیله انواع تکنیک‌های غیرمخرب از قبیل آکوستیک، میکروویو، حرارتی، رادیوگرافی و روش‌های استاتیکی کلاسیک شناسایی شده‌اند (Bucur, 2003).

روش رادار نفوذی زمین (Ground Penetration Radar)

روش‌های مختلفی در ارزیابی‌های غیرمخرب مواد چوبی استفاده می‌شود که مهمترین آنها عبارت است از: بازرسی چشمی و نوری، فراصوت، گسیل صوتی، الکترومغناطیسی، رادیوگرافی و روش‌های هسته‌ای می‌باشد (Hubschen *et al.*, 2021; Hellier, 2003; *al.*, 2016). در سال‌های اواخر قرن بیستم روش‌های مختلفی برای ارزیابی غیرمخرب محصولات چوبی با استفاده از تصویرنگاری

رطوبتی به وجود آمده استفاده کرد و کاربردهای رادار نفوذی در بناهای چوبی قدیمی از ابتدای قرن حاضر روند رو به رشدی را داشته است (Lualdi & Zanzi, 2002). برای نمونه، در هنگ‌کنگ برای تعیین پوسیدگی تیرهای چوبی تلگراف از این روش استفاده شد و نتایج به دست آمده وجود پوسیدگی در دو متر ابتدایی تیر را نشان داد. در این روش، تفاوت ضریب گذردهی الکتریکی بین مواد مورد تحقیق (سنگ، چوب و هوا) یک مزیت محسوب می‌شود و سبب می‌گردد که به عنوان روشی مناسب برای شناسایی غیرمخرب موقعیت، اتصالات و اندازه ساختارهای چوبی پنهان در ساختمان‌های قدیمی همراه با سایر مصالح مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، تخریب پیشرفته چوب (که به شکل یک توده خاک‌اره در می‌آید) موفقیت این روش را افزایش می‌دهد، زیرا باعث افزایش مقدار ضریب گذردهی الکتریکی شده و در نتیجه انکسار آشکاری اتفاق می‌افتد که باعث شناسایی موقعیت معایب در تیرها می‌گردد. مهمترین مزایای این روش عبارت است از: عدم نیاز به دسترسی به دو طرف نمونه، قابلیت شناسایی معایب عمومی (پوسیدگی و حفره)، توانایی شناسایی قسمت‌های خیلی مرطوب، تکرارپذیری خوب و عدم نیاز به جفت‌شدگی کامل با سطح چوب. محدودیت‌های این روش نیز عبارت است از: عدم تشخیص مطلوب معایب ریز، پیچیده بودن تفسیر داده‌ها و نیاز به تخصص برای پردازش داده‌ها (Riggio *et al.*, 2014). البته بازه فرکانسی مورد استفاده از چند مگاهرتز تا چند گیگاهرتز می‌تواند متغیر باشد، با توجه به نوع دستگاه معمولاً مقادیر متعدد ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵، ۱/۶، ۲ و ۲/۵ گیگاهرتز انتخاب می‌شود (Muller, 2003). بنابراین استفاده از فرکانس‌های بالای ۱/۵ تا ۲/۵ گیگاهرتز برای نفوذ بیشتر امواج و دستیابی به تصاویر با وضوح بیشتر پیشنهاد شده است (Riggio *et al.*, 2014). هرچند افزایش فرکانس ممکن است سبب افزایش پارازیت در داده‌های دریافتی نیز بشود.

روش رادار نفوذی زمین برای شناسایی معایب داخلی گرده‌بینه‌ها، در واحدهای فراوری اولیه چوب مانند کارخانه‌های چوب‌بری قابل استفاده است (Devaru *et al.*,

GPR) بر پایه استفاده از امواج الکترومغناطیس است. تاریخچه استفاده از این روش به اواسط دهه ۱۹۷۰ و ارزیابی روسازی و زیرسازی جاده‌ها برمی‌گردد. این روش در سال‌های اخیر کاربردهای متنوع‌تری پیدا کرده است و در ژئوفیزیک و زمین‌شناسی، شناسایی و ارزیابی اجسام مدفون در زمین، ارزیابی جاده‌ها و زیرسازی آنها، ارزیابی خطوط حمل‌ونقل ریلی، سازه‌های بتنی و اخیراً ارزیابی‌های سازه‌های چوبی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Schultz, 2007, Peng *et al.*, 2014, Khakiev *et al.*, 2014, Hoegh *et al.*, 2015, Sbartai, 2010). به طور کلی، کاربرد این روش در ارزیابی مواد چوبی جدید بوده و سابقه طولانی ندارد.

این سیستم دارای دو آنتن یکی فرستنده و دیگری گیرنده امواج، منبع تولید امواج الکترومغناطیسی و یک رایانه قابل حمل برای پردازش داده‌ها با کمک نرم‌افزار مخصوص است. اندازه‌گیری‌ها بر پایه امواج بازتاب شده الکترومغناطیسی می‌باشد و کمیت تعیین‌کننده در بازتاب این امواج از ساختارهای تحت بررسی، ضریب «گذردهی الکتریکی» (Permittivity) نام دارد. انرژی این امواج که در مواد پخش می‌شود، در سطح مشترک دو ماده با ضرایب دی‌الکتریک متفاوت تضعیف شده، بازتاب و یا شکسته می‌شود و موج تابیده شده از این فصل مشترک قابل آشکارسازی است. بررسی خصوصیات سیگنال‌های ثبت شده مانند سرعت و میرایی می‌تواند اطلاعات فیزیکی و هندسی مواد را ارائه کند. دستگاه‌های رادار نفوذی زمین، زمان دریافت سیگنال‌ها را اندازه می‌گیرند، از این رو بازتاب از ساختارهای زیرسطحی به صورت تابعی از زمان نمایش داده می‌شود. برای اینکه رویدادهای بازتابی پاسخ صحیحی از عمق ساختارهای زیرسطحی باشند، مقادیر ثبت شده وابسته به زمان بایستی به عمق صحیح‌شان نسبت داده شود. این تبدیل با استفاده از توزیع سرعت امواج رادار نفوذی زمین در نمونه مورد بررسی انجام می‌شود.

انجمن زمین‌شناسی انگلستان در سال ۲۰۰۲ در گزارشی بیان کرده از رادار نفوذی زمین می‌توان برای بررسی ساختار درونی تیرهای چوبی و درختان، به ویژه در ارتباط با اختلاف

سرعت، میرایی و پراکندگی سیگنال‌های راداری می‌شود، در صورتی که ضخامت نمونه تیر معلوم باشد چنین تغییراتی می‌تواند برای شناسایی مکان حضور رطوبت موجود مورد استفاده قرار گیرد (Rodríguez-Abad *et al.*, 2010). به‌طور کلی، رادار نفوذی امکان تخمین واقعی گذردهی نسبی مواد چوبی را داراست و نسبت به تغییرات رطوبت حساسیت معنی‌داری دارد (Reci *et al.*, 2016).

با توجه به جهت ارسال امواج و بافت ناهمگن چوب، آشفتگی و پراکندگی امواج زیاد اتفاق می‌افتد که به‌همین دلیل استفاده از فیلترهای پردازش در مورد نمونه‌های چوب ضروریست. معمولاً فیلترهای زمانی و مکانی باهم ترکیب می‌شوند تا فیلترهای دوبعدی (قائم-افقی) را ایجاد کنند. این فیلترها عبارت است از: دی‌واو (Dewow)، ضد آشفتگی (Deconvolution)، تقویت زمانی (Gain)، حذف زمینه (Background Removal) و مهاجرت (Migration). فیلتر «دی‌واو»، برای حذف فرکانس‌های پایین و کاهش آشفتگی‌های حاصل از نویزها اعمال می‌شود. این فیلتر، جزء مهمترین و پرکاربردترین فیلترهای رادار نفوذی می‌باشد و معمولاً بدون توجه به نوع محیط می‌تواند اعمال شود. از فیلتر «ضد آشفتگی» نیز برای کاهش آشفتگی پالس و افزایش وضوح تصویر و از فیلتر «تقویت زمانی» برای یکسان‌سازی سیگنال‌های دریافتی از عمق‌های مختلف استفاده می‌گردد، زیرا سیگنال‌های بازتابی از عمق‌های بالاتر در مقایسه با سیگنال‌های بازتابی از عمق‌های نزدیک به سطح بسیار ضعیف‌تر هستند. از این‌رو باید توجه داشت که با این فیلتر هم سیگنال و هم نویز تقویت می‌شوند، بنابراین در استفاده از این فیلتر باید دقت بیشتری اعمال شود. از فیلتر «حذف زمینه» نیز برای حذف نویزهای زمینه استفاده می‌شود. این فیلتر ابزاری بسیار مناسب برای حذف پدیده حلقوی شدن تصاویر می‌باشد و بازتابنده‌های کم‌شیب را نیز حذف می‌کند. استفاده از این فیلتر یک مرحله کلیدی در پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی در مواد چوبی به‌ویژه چوب‌های مرطوب است، در نتیجه برای بهبود کیفیت تصاویر و مشخص کردن مرز بین دو محیط می‌تواند مفید باشد. یکی از پردازش‌های مهم، استفاده از فیلتر

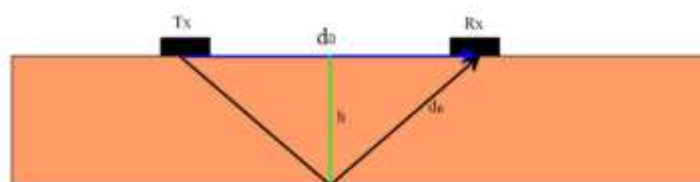
(2005). طی مطالعات انجام‌شده عمق و موقعیت معایب در گرده‌بینه‌ها مانند گره، فلزات و پوسیدگی‌ها با دقت خوبی شناسایی شدند، اما میخ‌های فلزی به طول ۲/۵ سانتی‌متر و قطر ۴ میلی‌متر به علت اندازه کوچک آنها قابل شناسایی نبودند. در مطالعه دیگری، حفره خالی با قطر بزرگ‌تر از ۹/۵ میلی‌متر، گره‌ها و پوسیدگی‌های بزرگ و مناطقی که اختلاف رطوبت بالایی نسبت به سایر مناطق چوب داشتند شناسایی شدند (Halabe, *et al.*, 2009). به‌طور کلی، روش رادار نفوذی توانایی شناسایی حفره‌های بزرگ را به خوبی دارد (Hernandez & Duwadi, 2000)، اما در شناسایی حفره‌های کوچک‌تر محدودیت دارد (Butnor *et al.*, 2009). گزارش‌های متعددی مبنی بر امکان شناسایی با دقت بالای پوسیدگی قارچی در تیرهای سازه‌ای سوزنی‌برگان با استفاده از این روش منتشر شده است (Senalik *et al.*, 2016).

نوع گونه و تفاوت خواص چوب در جهات ارتوتروپیک استفاده از روش رادار نفوذی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری که سرعت انتشار، دامنه امواج مستقیم و بازتاب‌شده و طیف فرکانس با توجه به جهت الیاف ممکن است متفاوت باشد (Rodríguez-Abad *et al.*, 2010; Kloiber *et al.*, 2012; Reci *et al.*, 2016).

به‌طور کلی، زمانی که میدان الکتریکی عمود بر الیاف چوب است سرعت انتشار امواج بیشتر و مقدار ضریب گذردهی الکتریکی پایین‌تر خواهد بود. همچنین زمانی که میدان الکتریکی موازی الیاف باشد دامنه امواج مستقیم و بازتاب‌شده در مقایسه با زمانی که میدان الکتریکی عمود بر الیاف است کمتر است. در همین ارتباط، به علت بزرگ‌تر بودن سرعت انتشار امواج در جهت طولی در مقایسه با جهت عرضی، این تکنیک قابلیت مطالعه روی خواص دی‌الکتریک چوب را در جهات مختلف مهیا می‌سازد که در این حالت سلولز تأثیر بسزایی دارد (Martínez-Sala *et al.*, 2013; Madhoushi *et al.*, 2017).

مطالعات نشان داده است که رطوبت ماده بر روی دامنه سیگنال، خصوصیات فرم موج رادار و زمان انتشار امواج رادار نفوذی تأثیر می‌گذارد. آب مقدار ضریب گذردهی بالایی دارد و به‌همین دلیل رطوبت داخل چوب باعث کاهش

در روش رادار نفوذی، سرعت امواج در نمونه با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود. همانطور که می‌دانیم برای محاسبه سرعت، رابطه کلی  $v = d/t$  حاکم است که در آن  $d$  مسافت طی شده و  $t$  زمان می‌باشد. با توجه به شکل ۱ مسافت طی شده توسط امواج بر اساس رابطه ۱ به دست می‌آید.



شکل ۱- تصویر شماتیک از فاصله بین آنتن‌ها، فاصله طی شده امواج و ضخامت نمونه

Figure 1. Schematic image of the distance between the antennas, the distance traveled by the waves and the thickness of the sample

$$D = \frac{C \times t}{2 \times \sqrt{\epsilon'}} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن  $D$ : عمق هدف مورد نظر، با توجه به پالس امواج از فرستنده تا برگشت بازتاب از معایب و دریافت آن توسط دستگاه است. ضریب بازتابش برای تعیین میزان انعکاس و جذب امواج به کار می‌رود و با استفاده از رابطه ۶ تعیین می‌شود.

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon'1} - \sqrt{\epsilon'2}}{\sqrt{\epsilon'1} + \sqrt{\epsilon'2}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در داخل کشور استفاده از روش رادار نفوذی در بررسی معایب داخلی چوب، فقط محدود به یک مطالعه در مورد پهن‌برگان است که در آن سه گونه پهن‌برگ راش، ممرز و توسکا از درختان جنگلی منطقه شصت‌کلاته در سه دامنه رطوبتی سبز، هوا خشک (۱۴٪) و کاملاً خشک (۶٪) که حاوی حفره‌های داخلی مصنوعی در اندازه‌های مختلف و در جهات مختلف بودند بررسی شد (Madhoushi et al., 2017). نتایج این بررسی نشان داد که ضریب دی‌الکتریک نسبی در چوب‌های با رطوبت بالا نسبت به چوب‌های خشک بیشتر است و حفره‌های موجود در چوب‌های با رطوبت بالا به علت افزایش اختلاف ضریب دی‌الکتریک دو محیط (چوب

«مهاجرت» است که برای انتقال نقاط بازتاب به محل واقعی خود استفاده می‌شود. پس از اعمال این پردازش، شکل واقعی تری از معایب به دست می‌آید، زیرا تصاویر اولیه ایجاد شده دارای الگوی‌های شبه‌هدلولی هستند که قابل تفسیر نیست (Goodman & Piro, 2013)

$$d_R = 2 \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + h^2} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$v = \frac{2 \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}}{\Delta t} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن  $d_R$ : مسافت طی شده توسط امواج،  $v$ : سرعت امواج در نمونه،  $h$ : ضخامت نمونه،  $d_0$ : فاصله آنتن‌های فرستنده و گیرنده،  $\Delta t$ : زمان رفت و برگشت موج است. همچنین برای برآورد ضریب دی‌الکتریک چوب از رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده می‌شود.

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon'}} \quad \text{معادله (۳)}$$

$$\epsilon' = \left(\frac{C}{v}\right)^2 \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن  $\epsilon'$ : ضریب دی‌الکتریک ماده،  $t$ : زمان رفت و برگشت امواج،  $C$ : سرعت نور در هوای آزاد است. موقعیت معایب یا فاصله قرارگیری عیب از سطح نمونه با کمک رابطه ۵ قابل محاسبه است.

روش (Madhoushi, 2016) انجام شد. نمونه‌های انتخاب شده به صورت چشمی بررسی گردیدند و انتخاب از میان نمونه‌هایی عاری از حفره‌های حشرات چوب‌خوار بودند. همچنین نمونه‌های سالم و کاملاً خشک از درختان جنگلی راش و بلوط هر یک به تعداد دو نمونه به عنوان نمونه شاخص و مبنای مقایسه انتخاب شدند، اما نمونه‌های سرخدار از یک ساختمان قدیمی و به تعداد چهار عدد و فاقد پوسیدگی انتخاب شد. یادآوری می‌شود که در نمونه‌های سرخدار امکان تهیه نمونه جنگلی وجود نداشت. در چهار نمونه راش و بلوط دارای پوسیدگی و دو عدد از نمونه‌های سرخدار حفره‌هایی به قطر دو و هشت میلی‌متر (در جهت عرض نمونه) ایجاد شد. عوامل متغیر مورد مطالعه عبارت بودند از: نوع گونه: راش، بلوط، سرخدار و کیفیت گونه: سالم، پوسیده و حضور یا عدم حضور حفره‌های مصنوعی ایجاد شده. عوامل ثابت عبارت بودند از: فرکانس: ۲/۳ گیگاهرتز (فرکانس بالا)، جهت داده‌برداری: عمود بر الیاف، الگوی برش: مماسی و شرایط داده‌برداری و پردازش داده‌ها: یکسان.

ابتدا نمونه‌ها توسط دستگاه رادار نفوذی با سه مرتبه تکرار ارزیابی شدند. داده‌برداری با حرکت آرام دستگاه روی نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه و دمای برابر برای همه نمونه‌ها انجام شد (شکل ۱). مبنای روش اندازه‌گیری مطابق روش اتخاذ شده در مطالعه قبلی (Madhoushi et al., 2017) بود، اما در این مطالعه برای اسکن نمونه‌ها فقط جهت عمود بر الیاف انتخاب شد که با مطالعه قبلی که در دو جهت بود تفاوت داشت.

#### تصویربرداری رادار نفوذی

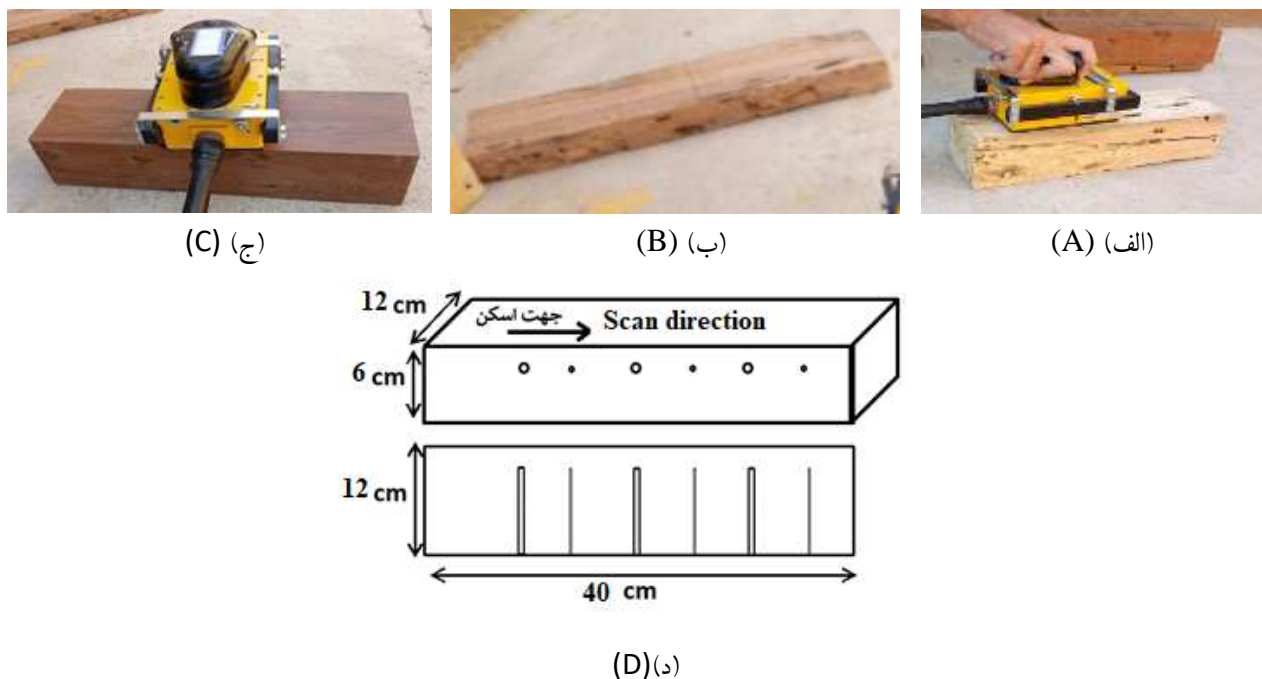
دستگاه رادار نفوذی مورد استفاده در این تحقیق، مدل Mala CX با آنتن‌های فرکانس بالا ۲/۳ گیگاهرتز بود. مشخصات دستگاه و آنتن‌ها عبارت بودند از: فرکانس نمونه‌برداری ۲۲۹۱۴ مگاهرتز، تعداد نمونه‌گیری ۱۶۸، قدرت تفکیک آنتن ۰/۰۴ متر، فاصله ردیابی ۰/۰۲ متر، ابعاد ۱۱۰ × ۹۰ × ۱۶۰ میلی‌متر و وزن ۰/۶ کیلوگرم یادآوری می‌شود

مرطوب نسبت به هوای محصور در حفره‌ها) وضوح بهتری نسبت به چوب‌های خشک دارند. اما این روش قابلیت شناسایی حفره‌های با قطر کمتر از چهار میلی‌متر را نداشت. در این مطالعه، برای اولین بار در داخل کشور امکان استفاده از روش رادار نفوذی در شناسایی معایب داخلی (حفره‌های مصنوعی) و تخریب‌های پوسیدگی در تیرهای چوبی موجود در ساختمان‌های قدیمی چوبی منطقه گرگان بررسی شد. هدف اصلی، بررسی توانایی این روش (به عنوان یک روش سریع و غیرمخرب) در ارزیابی پوسیدگی و احیاناً وجود معایب در چوب‌های سازه‌ای در حال سرویس ساختمان‌های موجود و همچنین بناهای تاریخی مهم کشور و همچنین معرفی برخی از نکات فنی در این ارتباط بود که باید لحاظ شود. در این ارتباط، یادآوری می‌شود که در مقایسه با گزارش قبلی منتشر شده (Madhoushi et al., 2017)، در این مطالعه علاوه بر گونه راش که مشترک بود، دو گونه بلوط و سرخدار برای اولین بار مورد مطالعه قرار گرفت. دلیل انتخاب این سه گونه به این علت بود که از آنها در ساخت بناهای تاریخی منطقه گرگان استفاده‌های فراوانی شده است (Madhoushi, 2016) که در این ارتباط، با توجه به گذشت سال‌های زیاد از سرویس آنها، بلوط به‌طور کم‌وبیش دچار تخریب‌های پوسیدگی کمتر و گونه سرخدار از نظر مقاومت‌های مکانیکی و دوام طبیعی دارای وضعیت نسبتاً مناسب‌تر و بیشتر سالم هستند. همچنین در مطالعه فعلی، از چوب‌های خشک ساختمانی استفاده گردید تا تأثیر کمبود رطوبت در نمونه‌ها (به عنوان یک عامل منفی مؤثر در این روش) بررسی شود.

#### مواد و روش‌ها

##### مواد

برای این مطالعه از سه گونه راش، بلوط و سرخدار ۱۲ نمونه به ابعاد ۱۲۰ × ۶۰ × ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از گونه راش دو نمونه با پوسیدگی شدید و از گونه بلوط دو نمونه با پوسیدگی خفیف از ساختمان‌های چوبی قدیمی انتخاب شد. مبنای تعیین شدت پوسیدگی نمونه‌ها بر اساس



شکل ۲- تصاویری از دستگاه رادار نفوذی و نمونه‌های مورد استفاده برای مطالعه: (الف) چوب راش دارای پوسیدگی، (ب) چوب بلوط دارای پوسیدگی، (ج) چوب سرخدار فاقد پوسیدگی، (د) تصویر شماتیک از نمونه و حفره‌های دو و هشت میلی‌متری ایجادشده  
**Figure 2. GPR device and wood samples used for the study: (a) Beech with decay, (b) Oak with decay, (c) Yew without decay, (d) Schematic image of the sample with holes of 2 and 8 mm.**

مختلف زمانی و مکانی روی داده‌های خام رادار نفوذی اعمال گردید تا تصاویری با وضوح مناسب در اختیار قرار گیرد. این فیلترها عبارت بودند از: دی‌واو، ضد آشفستگی، تقویت زمانی، حذف زمینه و مهاجرت (Goodman & Piro, 2013). در نهایت، پس از اندازه‌گیری سرعت رفت و برگشت امواج رادار در نمونه‌های چوبی و با وارد کردن مقادیر آنها در پردازش فیلتر «مهاجرت»، سعی شد تا تصاویر واقعی‌تری از معایب بدست آید. جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌ها مطابق روش مطالعه قبلی (Madhoushi *et al.*, 2017) انجام شد. برای این منظور، برای هر نمونه تصویربرداری با سه تکرار به‌وسیله دستگاه انجام و میانگین پارامترهای مورد نظر به‌طور مستقیم توسط تحلیل‌گر دستگاه اعلام و پس از محاسبه مطابق روابط ۱ تا ۶ برای مقایسه استفاده شد. در این تحقیق، با توجه به ماهیت مطالعه، روش و دستگاه اغلب خود تصاویر پردازش‌شده به‌طور مستقیم برای تحلیل و مطالعه ماده کاربرد دارد. علاوه بر آن، جدول‌های حاوی اطلاعات عوامل اصلی شامل سرعت

که در حال حاضر دستگاه مورد استفاده شاید تنها مورد موجود در کشور برای استفاده در مواد چوبی باشد و اطلاعات وجود دستگاه دیگری برای محققان محرز نشده است. تعیین سرعت انتشار امواج و ضریب دی‌الکتریک نمونه‌ها با استفاده از زمان رفت و برگشت موج انجام شد. از آنجایی که امواج راداری با عبور از نمونه دچار تضعیف دامنه می‌شوند، برای شناسایی بهتر طرف دیگر نمونه‌ها از یک صفحه فلزی در طرف دیگر نمونه استفاده شد تا با قوی‌شدن بازتاب، شناسایی انتهای نمونه با سهولت بیشتر انجام شود. در این مطالعه سرعت امواج در نمونه با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ و ضریب دی‌الکتریک با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه شد.

#### پردازش تصویر

عملیات استخراج، پردازش و تصحیح داده‌های خام با کمک نرم‌افزار تخصصی Reflexw متصل به دستگاه و نرم افزار MATLAB انجام شد. در عملیات پردازش، فیلترهای

پس از محاسبه سرعت انتشار امواج راداری و ضریب دی الکتریک در جهت طولی-مماسی نمونه‌ها با استفاده از روابط ۱ تا ۴، نتایج نشان داد که سرعت امواج راداری در نمونه‌های سالم بیشتر از نمونه‌های پوسیده بود. همچنین نمونه‌های پوسیده ضریب دی الکتریک بالاتری داشتند (جدول ۱).

موج، ضریب دی الکتریک و ضریب بازتابش نیز تهیه گردید. به همین دلیل، در این تحقیق از روش‌های متداول آماری مانند تحلیل واریانس و آزمون دانکن استفاده نشد.

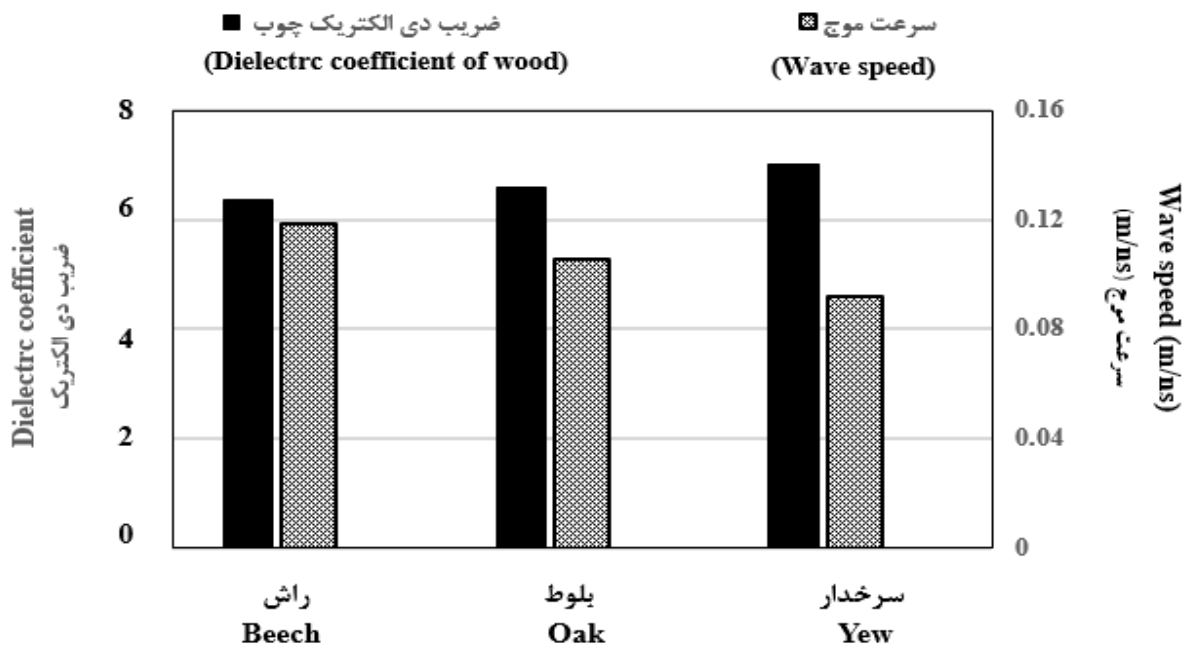
## نتایج

### سرعت امواج الکترومغناطیس و ضرایب دی الکتریک

جدول ۱- سرعت انتشار امواج راداری (طولی- مماسی)، ضریب دی الکتریک و ضریب بازتابش در نمونه‌ها

**Table 1- Speed of radar waves propagation (longitudinal-tangential), dielectric coefficient and its reflection coefficient in the samples**

ضریب بازتابش Reflection coefficient	ضریب دی الکتریک Dielectric coefficient	سرعت موج (m/ns) Wave speed (m/ns)	نوع گونه Species type	
-0.35	4.4	0.143	سالم (Sound)	راش (Beech)
-0.46	7.42	0.11	پوسیده (Decayed)	
-0.35	4.28	0.145	سالم (Sound)	بلوط (Oak)
-0.43	6.25	0.12	پوسیده (Decayed)	
-0.36	4.59	0.14	سالم (Sound)	سرخدار (Yew)



شکل ۳- میانگین سرعت انتشار امواج راداری و ضریب دی الکتریک در سه گونه چوب

**Figure 3. The average propagation speed of radar waves and dielectric coefficient in three types of wood**

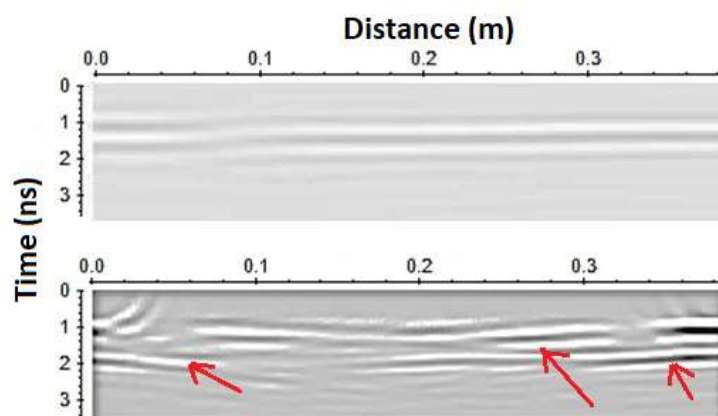
به طور مطلوب نتایج مؤثری در افزایش وضوح تصویر در همه نمونه‌ها داشتند.

شکل ۴ تصویر رادار نفوذی از چوب راش سالم و دارای پوسیدگی شدید را نشان می‌دهد. در نمونه‌های دارای پوسیدگی، معایب با رنگ‌های تیره دیده می‌شوند که از مناطق فاقد پوسیدگی قابل تمایز می‌باشد. به دلیل شدت زیاد پوسیدگی و درهم‌ریختگی بیشتر امواج بازتابی در گونه راش، حفره‌های مصنوعی ایجاد شده در آن شناسایی نشد. همچنین، شکل ۵ تصاویر رادار نفوذی از چوب بلوط سالم و دارای پوسیدگی خفیف را نشان می‌دهد. پوسیدگی خفیف در این نمونه و حفره‌های مصنوعی ۸ میلی‌متر ایجاد شده با علامت پیکان در شکل مشخص شده است. شکل ۶ نیز تصویر رادار نفوذی از چوب سرخدار سالم و سرخدار سالم دارای حفره‌های مصنوعی می‌باشد. در این نمونه که از ابتدا سالم به نظر می‌رسید علائمی از پوسیدگی داخلی در تصاویر دیده نشد، اما در مقابل حفره‌های ۸ میلی‌متر قابل مشاهده بودند. نتایج این تحقیق در مورد عدم امکان شناسایی حفره‌های کوچک با استفاده از رادار نفوذی زمین با مطالعات قبلی نیز تطابق دارد (Halabe, et al., 2009; Butnor et al., 2017; Madhoushi et al., 2009).

تحلیل آماری نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد در سرعت انتشار امواج راداری در چوب‌های سالم و پوسیده وجود دارد، اما سرعت موج در بین گونه‌های مورد بررسی در بین گونه‌های سالم با یکدیگر و گونه‌های پوسیده با یکدیگر به‌طور کلی اختلاف معنی‌داری نداشت؛ به عبارتی سرعت انتشار مستقل از گونه چوبی است (شکل ۳). سرعت امواج الکترومغناطیسی با ویژگی دی‌الکتریک و ضریب شکست محیط رابطه عکس دارد (Martinho & Dionísio, 2014). نتایج همچنین نشان داد در سطح ۵ درصد ارتباط معنی‌داری بین نوع گونه‌های مورد مطالعه و ضریب دی‌الکتریک وجود نداشت و مقدار آن در همه نمونه‌ها تقریباً برابر بود. اما بین چوب‌های پوسیده و سالم اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (شکل ۳).

### تصویرنگاری رادار نفوذی در گونه‌های چوبی

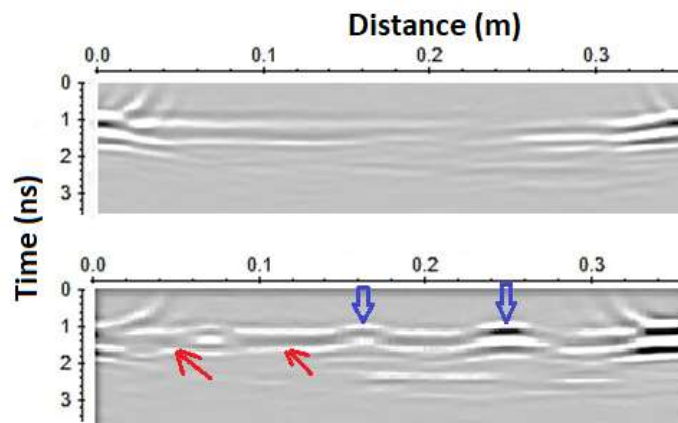
نتایج فیلتراسیون به‌وسیله نرم‌افزار برای پردازش بهتر تصاویر مشخص کرد که فیلتر «دی‌واو» برای حذف آشفتگی امواج و به‌دلیل رطوبت کم نمونه‌ها مفید و مؤثرتر بود (Laurens et al., 2005). اما فیلتر «تقویت زمانی» به دلیل خشک‌بودن نمونه‌های مورد آزمون و ضخامت کم نمونه‌ها تأثیر کمی داشت. به‌علاوه، فیلتر «حذف زمینه» و «مهاجرت»



شکل ۴- تصویر رادار نفوذی از چوب راش سالم (بالا) و دارای پوسیدگی شدید و حفره‌های مصنوعی (پایین) با قابلیت ردیابی پوسیدگی (فلش قرمز)

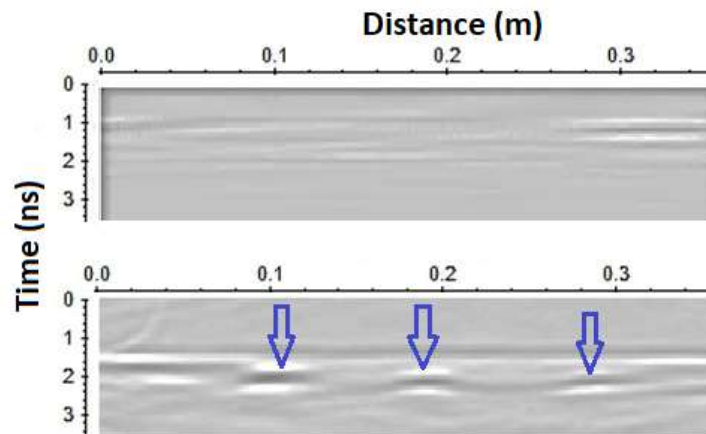
Figure 4- GPR image of sound beech wood (top) and with severe decay and artificial holes (bottom) and with the capability to track the decay (red arrow).





شکل ۵- تصویر رادار نفوذی از چوب بلوط سالم (بالا) و دارای پوسیدگی خفیف و حفره‌های مصنوعی (پایین) با قابلیت ردیابی پوسیدگی و حفره‌های مصنوعی ۸ میلی‌متر (فلش قرمز: پوسیدگی، فلش آبی: حفره‌های مصنوعی)

**Figure 5- GPR image of sound oak wood (top) and with mild decay and artificial holes (bottom) and with the capability to track the decay and artificial holes of 8 mm (red arrow: decay, blue arrow: artificial holes).**



شکل ۶- تصویر رادار نفوذی از چوب سرخدار سالم (بالا) و سرخدار سالم دارای حفره‌های مصنوعی (پایین) با قابلیت ردیابی حفره‌ها (فلش آبی)

**Figure 6- GPR image of healthy yew wood (top) and healthy yew with artificial holes (bottom) and with the capability to track the hole (blue arrow)**

سبب تغییر در ضریب دی‌الکتریک محیط مورد ارزیابی می‌شود. البته هرچه مقدار ضریب بازتابش بیشتر باشد بازتاب‌های قوی ثبت می‌گردد (Halabe, et al., 2009). از آنجایی که اساس کار روش رادار نفوذی بر مبنای اختلاف ضرایب دی‌الکتریک دو محیط استوار است، هر چه این اختلاف بیشتر باشد وضوح تصاویر بیشتر خواهد شد. بنابراین با توجه به اختلاف ضریب بازتابش بین چوب‌های سالم و پوسیده در نمونه‌های مورد مطالعه، می‌توان چوب سالم و

ضریب بازتابش: ضرایب بازتابش هر نمونه با استفاده از ضریب دی‌الکتریک آنها محاسبه شد (جدول ۱). اگر هوا را محیط اول و ضریب دی‌الکتریک ( $\epsilon_1$ ) آن را ۱ در نظر بگیریم، آنگاه از طریق رابطه ۶ می‌توان به ضریب بازتابش دست یافت. همانطوری که مشخص است ضریب بازتابش در چوب‌های دارای پوسیدگی مقدار کمتری در مقایسه با چوب‌های سالم داشتند. علت تغییر ضرایب دی‌الکتریک به مقدار رطوبت، بافت چوب و سرعت امواج مربوط می‌شود که

پوسیده را شناسایی کرد.

موقعیت معایب: قابلیت شناسایی موقعیت نسبتاً دقیق معایب (فاصله عیب از سطح نمونه) با کمک رابطه ۵ ارزیابی شد. فاصله واقعی عیوب از سطح نمونه‌ها با اعداد محاسبه شده مطابقت داشت و به آسانی موقعیت سایر معایب نیز به وسیله همین محاسبات قابل دستیابی بود. به عبارت دیگر، این سیستم به خوبی توانایی شناسایی نسبتاً دقیق موقعیت معایب را دارد. محققان قبلی نیز نتایج مشابهی در این مورد گزارش کرده‌اند (Halabe, et al., 2009; Madhoushi et al., 2017).

### بحث

در این مطالعه از روش غیرمخرب رادار نفوذی زمین (GPR) برای ارزیابی معایب چوب‌های ساختمان چوبی قدیمی استفاده شد و با چوب‌های سالم مقایسه گردید. بعد از اسکن نمونه‌ها و داده‌برداری اولیه تصاویر، برای افزایش وضوح و تفسیر بهتر تصویر فیلتراسیون‌های مختلف به کمک نرم‌افزار مخصوص دستگاه اعمال گردید. نتایج فیلتراسیون مشخص کرد که فیلترهای «دی واو»، «حذف زمینه» و «مهاجرت» نتایج مؤثرتری در افزایش وضوح تصویر در همه نمونه‌ها داشتند.

طبق نتایج به دست آمده، ضریب دی‌الکتریک نسبی در چوب‌های با پوسیدگی نسبت به چوب‌های سالم بیشتر بود که مطابق با یافته‌های قبلی اگر اختلاف دی‌الکتریک بین دو ماده بالا باشد ضریب بازتابش زیاد می‌شود و بازتاب قوی می‌دهد (Halabe, et al., 2009). نتایج این مطالعه در تشخیص پوسیدگی چوب یهن‌برگان با یافته‌های قبلی در شناسایی حفره‌های پوسیدگی در تیرهای گلولم از دوگلاس فر نیز همخوانی دارد (Senalik et al., 2016).

در مجموع می‌توان بیان کرد که از این روش می‌توان به عنوان روشی ایمن و غیرمخرب برای شناسایی نسبی معایب و حفره‌های داخلی چوب‌ها استفاده نمود که نیازی به دسترسی به دو طرف نمونه ندارد. در صورت وجود تخصص در اسکن و پردازش تصاویر، عملیات پردازش با اعمال

فیلترهای پیش فرض برنامه‌نویسی شده، به سرعت و در عرض کمتر از چند دقیقه قابل اجراست. مهمترین عامل تأثیرگذار روی وضوح و دقت اندازه‌گیری با روش رادار نفوذی اختلاف ضریب دی‌الکتریک دو محیط مجاور می‌باشد. در زمانی که ماده مورد بررسی دارای رطوبت بالا باشد اختلاف ضریب دی‌الکتریک موجود بین ماده مرطوب و هوا سبب بهتر شدن شناسایی حفره‌های خالی (پرسیده از هوا) می‌شود (Laurens et al., 2005). در صورتی که حفره‌ها از آب پر شده باشند با توجه به ضریب دی‌الکتریک آب در دمای معمولی (۲۰ درجه) و چوب مرطوب که به ترتیب ۸۱ و ۱۰ - ۲۰ می‌باشد، همچنان امکان تمایز بین حفره و سایر نواحی چوبی وجود دارد. به طور کلی، باید اختلاف در خواص دی‌الکتریک دو محیط به اندازه کافی زیاد باشد تا بتوان مناطق معیوب را از مناطق سالم تشخیص داد. اما در چوب‌های ساختمانی به دلیل کم بودن رطوبت آنها (حدود ۱۰ درصد) و عدم وجود این مزیت، امکان استفاده از روش رادار نفوذی تا حدودی می‌تواند همراه با دشواری و نیاز به فیلتراسیون دقیق تر تصاویر باشد.

### سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت مالی و در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است، بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه قدردانی می‌شود.

### منابع مورد استفاده

- Butnor, J. R., Pruyn, M. L., Shaw, D. C., Harmon, M. E., Mucciardi, A. N., and Ryan, M. G., 2009. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges. *Forest pathology*, 39(5): 309-322.
- Bucur, V. 2003. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer.
- Devaru, D., Halabe, U.B., Gopalakrishnan, B., Agrawal, S., and Grushecky Sh. (2005). Algorithm for detecting defects in wooden logs using ground penetrating radar. *Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI*.

- Madhoushi, M., Hatefnia, H., Ebrahimi, Gh., and Amini, N., 2017. Application of GPR technique in evaluation of internal defects in hardwood species. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 8(2): 225-239.
- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Barra, R. D., and Capuz-Lladró, R., 2013. Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. *Construction and Building Materials*, 38: 903-911.
- Martinho, E., and Dionísio, A., 2014. Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11: 053001.
- Muller, W. (2003). Timber girder inspection using ground penetrating radar. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45(12): 809-812.
- Reci, H., Maï, T. C., Sbartai, Z.M., Pajewski, L., and Kiri, E., 2016. Non-destructive evaluation of moisture content in wood using ground-penetrating radar. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(2): 575-581.
- Riggio, M., Anthony, R. W., Augelli, F., Kasal, B., Lechner, T., Muller, W., and Tannert, T., 2014. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*, 47(5): Sbartai, M. (2010). Ground penetrating radar. In: *In Situ Assessment of Structural Timber*. 25-37. Springer, Dordrecht.
- Rodríguez-Abad, I., Martínez Sala, R. M., García García, F., and Capuz Lladró, R., 2010. Non-destructive methodologies for the evaluation of moisture content in sawn timber structures: ground-penetrating radar and ultrasound techniques. *Near Surface Geophysics*. 8(6): 475-482.
- Schultz, J. J., 2007. Using ground-penetrating radar to locate clandestine graves of homicide victims: forming forensic archaeology partnerships with law enforcement. *Homicide Studies*.
- Senalik, Ch. A., Wacker, J., Wang, X., and Jalinoos, F., 2016. Assessing the ability of ground-penetrating radar to detect fungal decay in Douglas-fir beams. In: *25<sup>th</sup> Research Symposium*, New Orleans: 110-116. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, Forest Products Laboratory.
- Xu, X., Peng, S., Xia, Y., and Ji, W., 2014. The development of a multi-channel GPR system for roadbed damage detection. *Microelectronics Journal*, 45(11): 1542-1555.
- 59990B.
- Goodman, D., and Piro, S. (2013). Basic Processing GPR. In: *GPR Remote Sensing in Archaeology*. 37-62.
- Halabe, U. B., Agrawal, S., and Gopalakrishnan, B., 2009. Nondestructive evaluation of wooden logs using ground penetrating radar. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 24(4): 329-346.
- Hellier, C. 2003. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill.
- Hernandez, J. E., and Duwadi, S. R., 2000. A nondestructive impulse radar tomographic imaging system for timber structures. *Public Roads*, 64(3): Nov/Dec., No. 00-0558.
- Hoegh, K., Khazanovich, L., Dai, S., and Yu, T., 2015. Evaluating asphalt concrete air void variation via GPR antenna array data. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 3: 27-33.
- Hübschen, G., Altpeter, I., Tschuncky, R., and Herrmann, H. G., 2016. *Materials characterization using Nondestructive Evaluation (NDE) methods*. Woodhead Publishing.
- Khakiev, Z., Shapovalov, V., Kruglikov, A., and Yavna, V., 2014. GPR determination of physical parameters of railway structural layers. *Journal of Applied Geophysics*, 106: 139-145.
- Kloiber, M., Tippner, J., Heřmánková, V., and Štainbruch, J., 2012. Comparison of results of measuring by current NDT methods with results obtained through a new device for wood mechanical resistance measuring. In: *8<sup>th</sup> Int. Con. Structural Analysis of Historical Constructions*, October.
- Laurens, S., Balayssac, J. P., Rhazi, J., Klysz, G., and Arliguie, G., 2005. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling. *Materials and Structure*, 38: 827-832.
- Lualdi, M., and Zanzi, L., 2002. GPR investigations to reconstruct the geometry of the wooden structures in historical buildings. In: *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Vol. 4758: 63-68. April. International Society for Optics and Photonics.
- Madhoushi, M., Ebrahimi, S., Omidvar, A., 2021. Structural health assessment of a historical building by using in situ stress wave NDT: a case study in Iran. *Cerne*, 27: e-102535.
- Madhoushi, M., 2016. Species and mechanical strengths of wood members in a historical timber building in Gorgan (North of Iran). *BioResources*, 11(2): 5169-5180.

## **Evaluation of the internal defects and decay in old timber building using non-destructive ground penetration radar (GPR) method**

**M. Madhoushi<sup>1\*</sup> and H. Hatefnia<sup>2</sup>**

1\*- Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: madhoushi@gau.ac.ir

2-PhD, Wood Composites, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: Jan., 2022

Accepted: May, 2022

### **Abstract:**

In this study, ground penetration radar (GPR) was used to assess the internal defects and decay of structural old timber in buildings and compare it with the sound wood. For this purpose, twelve samples of three wood species of beech, oak and yew with dimensions of 120 × 60 × 400 mm, and as flat sawn were selected. Two samples from beech species with severe decay and two samples from oak species with mild decay were selected from old buildings. Sound and completely dry samples of these species (two samples from each species) were also obtained from forest trees as an indicator. Four yew samples without decay were selected only from the old buildings. Holes with a diameter of 2 and 8 mm were drilled in decayed and also two yew samples. The samples were scanned perpendicular to the fibers direction using a HF antenna of 2.3 GHz. The condition of data collection and processing were the same for all samples. After the initial data collection, in order to increase the resolution and better interpretation of the image, different filtration process was applied using image processing software Reflexw. The results showed that the relative dielectric coefficient was higher in decayed wood, and due to the difference in reflection coefficient between sound and decayed wood, they can be distinguished from each other. It was also possible to detect holes of 8 mm in oak and yew species.

**Keywords:** Non-destructive testing, decay, ground penetration radar, old structural timber.