

استفاده از روش رادار نفوذی زمین (GPR) در ارزیابی معایب داخلی گونه‌های چوبی پهن‌برگ

چکیده

استفاده از روش آزمون غیر مخرب برای آزمون انواع مواد، پیوسته در حال گسترش است. رادار نفوذی زمین یکی از روش‌های غیر مخرب آزمون مواد بر پایه استفاده از امواج الکترومغناطیسی است که کاربرد آن در زمینه چوب و مواد چوبی سابقه چندانی ندارد. در این مطالعه از روش رادار نفوذی زمین (GPR) برای بررسی معایب داخلی چوب ۳ گونه پهن‌برگ داخلی در ۳ رطوبت مختلف استفاده شد. به‌منظور حذف عوامل تأثیرگذار بیرونی و نامشخص به‌طور مصنوعی معایبی با اندازه‌های مختلف داخل نمونه‌ها ایجاد شد و با دستگاه رادار نفوذی از نوع Mala CX با آنتن‌های HF و فرکانس مرکزی ۲۳۰۰ مگاهرتز داده‌برداری و با نرم‌افزار Reflexw، داده‌ها مورد پردازش قرار گرفتند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، ضریب دی‌الکتریک نسبی در چوب‌های با رطوبت بالا نسبت به چوب‌های خشک بیشتر است. در چوب‌های با رطوبت بالا به علت افزایش اختلاف ضریب دی‌الکتریک دو محیط (چوب مرطوب نسبت به هوای محصور در حفره‌ها) این روش بهتر عمل می‌کند و حفره‌های موجود وضوح بهتری نسبت به چوب‌های خشک دارند، اما در هیچ‌کدام از نمونه‌ها حفره‌هایی که قطر آن‌ها ۴ میلی‌متر و کمتر بود قابل شناسایی نبودند. در مجموع می‌توان بیان داشت که از این روش می‌توان به‌عنوان روشی ایمن و سریع برای شناسایی معایب و حفره‌های داخلی چوب‌ها بهره گرفت.

واژگان کلیدی: آزمون غیر مخرب، رادار نفوذی زمین، معایب داخلی چوب، ضریب دی‌الکتریک.

محراب مدهوشی*^۱

حمید هاتف‌نیا^۲

قنبر ابراهیمی^۳

نوید امینی^۴

^۱ دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۲ دانشجوی دکتری گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

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

^۴ استادیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:

madhoushi@gau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰

مقدمه

پیشرفت‌های حاصل در علوم و فناوری موجب شده است تا روش‌های قدیمی آزمون مواد که زمان‌بر و اغلب با تخریب نمونه همراه بوده، جای خود را به روش‌هایی بدهند که شناسایی، مکان‌یابی، اندازه‌گیری و ارزیابی معایب بدون ایجاد تخریب در نمونه صورت می‌گیرد و تحت عنوان آزمون‌های غیر مخرب شناخته می‌شوند. روش‌ها و دستگاه‌های زیادی برای این منظور استفاده می‌شود که هر یک با توجه به هزینه، سرعت، دقت و

ایمنی معایب و مزایایی دارند. در صنایع فرآورده‌های چوبی و مهندسی چوب نیز کاربرد این تکنیک‌ها در ارزیابی‌های مقاومتی و فیزیکی چوب و چندسازه‌های چوبی در حال افزایش است. بیشتر این تکنیک‌ها بر اساس ارسال امواج هستند مانند پراش اشعه ایکس و اولتراسونیک؛ اما این روش‌ها دارای معایبی هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌سازد مثلاً روش اولتراسونیک، سرعت عمل و دقت نسبتاً پایینی دارد و در بیشتر موارد به نمونه آسیب اندکی می‌زند و نیاز به تماس و دسترسی به دو طرف نمونه است.

مشترک دو ماده با ضرایب دی‌الکتریک متفاوت، تضعیف‌شده، بازتاب و یا منکسر می‌شود. بررسی و تحلیل سیگنال‌های ثبت‌شده مانند سرعت و میرایی می‌تواند اطلاعاتی فیزیکی و هندسی از مواد را ارائه کند. این روش در سازه‌های چوبی برای شناسایی معایب داخلی، ارزیابی‌های رطوبتی و جهت‌یابی قابل‌استفاده است اما نیاز به اپراتور ماهر برای تفسیر داده‌ها دارد. از GPR می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی در شناسایی معایب داخلی تیرهای چوبی بهره گرفت [۱۳]. همچنین وضوح تصاویر بستگی به فرکانس مورد‌استفاده دارد. امواج GPR با فرکانس بالا، طول‌موج کوتاه‌تری دارند و در صورتی که از طول‌موج بلندتر استفاده گردد وضوح خیلی پایین و شناسایی غیرممکن می‌شود. همچنین عمق نفوذ نیز بستگی به فرکانس و طول‌موج و جنس مواد دارد. در چوب عمق نفوذ با طول‌موج، دانسیته و رطوبت چوب مرتبط است [۱۴-۱۶]. امواج مورد‌استفاده در روش GPR، امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا هستند که از قوانین این امواج پیروی می‌کنند. معادلات ماکسول به لحاظ ریاضی چارچوب فیزیکی امواج الکترومغناطیسی را شرح می‌دهد، درحالی‌که روابط ترکیبی، ویژگی‌های مواد را به لحاظ کمی تعیین می‌کند. ترکیب این دو، پایه‌ای برای توصیف سیگنال‌های GPR به لحاظ کمی فراهم می‌کند. اساس ریاضی میدان‌های الکترومغناطیسی و روابط ساختمانی به‌دست‌آمده آن، از روابط زیر پیروی می‌کند که به معادلات ماکسول معروف هستند:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1) \quad \text{(قانون القای فارادی)}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2) \quad \text{(قانون آمپر به‌علاوه مکمل ماکسول)}$$

$$\nabla \cdot D = q \quad (3) \quad \text{(قانون گاوس)}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4) \quad \text{(قانون گاوس در مغناطیس)}$$

که در آن E بردار شدت میدان الکتریکی، q چگالی بار الکتریکی، B بردار چگالی شار میدان مغناطیسی، J بردار چگالی جریان الکتریکی، D بردار جابجایی الکتریکی، t زمان و H شدت میدان مغناطیسی است [۱۳].

ماکسول تمام تحقیقات و تلاش‌های محققان را به این شکل خلاصه کرد. تمام روابط الکترومغناطیسی کلاسیک

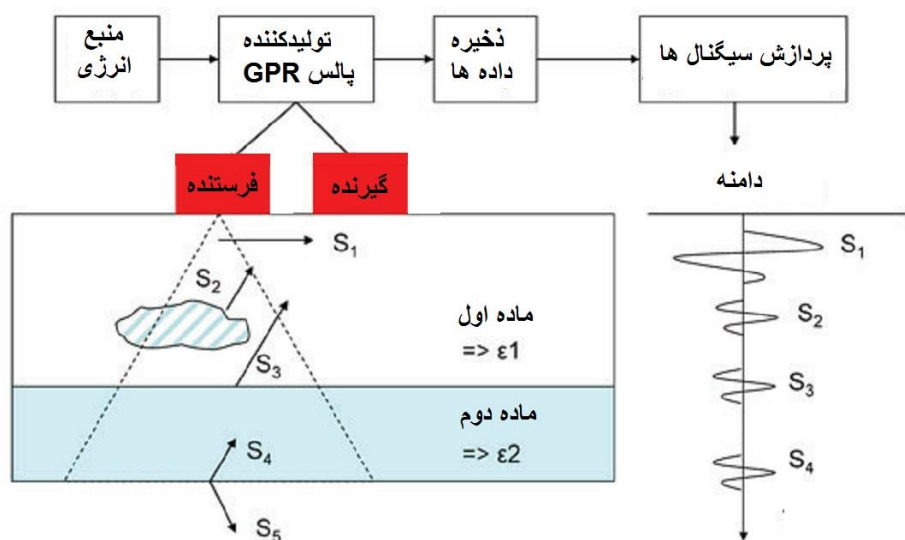
در استفاده از اشعه ایکس با وجود دقت بالا، پایین بودن ایمنی، نیاز به فضای مناسب و هزینه بالای نصب و نگهداری از نگرانی‌های استفاده از این تکنولوژی است. بر همین اساس، مطالعاتی در حال انجام است تا ضمن برطرف کردن نگرانی‌های ایمنی، از دقت و سرعت قابل‌قبولی نیز برخوردار باشد [۱]. روش رادار نفوذی زمین (GPR) یکی از روش‌های غیرمخرب و بر پایه استفاده از امواج الکترومغناطیسی^۲ (EM) است. دارای سرعت مناسب و هزینه‌های نگهداری نسبتاً پایین است و با توجه به فرکانس مورد‌استفاده، خطر چندانی برای سلامتی محسوب نمی‌شود. دستگاه مورد‌استفاده در این روش کوچک و قابل‌حمل بوده، چون از امواج بازتابی استفاده می‌کند نیازی به دسترس بودن دو طرف نمونه و تماس مستقیم آنتن‌های فرستنده و گیرنده با نمونه نیست اما پردازش داده‌های به‌دست‌آمده نیاز به تخصص دارد. تاریخچه استفاده از روش GPR در ارزیابی روسازی و زیرسازی جاده‌ها به اواسط دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد. در سال‌های اخیر این روش کاربردهای متنوع‌تری پیدا کرده است. کاربردهای نظامی [۲]، ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، شناسایی و ارزیابی اجسام مدفون در زمین [۳]، ارزیابی بناهای تاریخی [۴]، ارزیابی جاده‌ها و زیرسازی آن‌ها [۵]، پل‌ها [۶]، آسفالت [۷]، ارزیابی خطوط حمل‌ونقل ریلی [۸]، سازه‌های بتنی [۹] و اخیراً توسط تعدادی از محققان در ارزیابی‌های سازه‌های چوبی [۱۰، ۱۱، ۱۲] نیز مورد‌استفاده قرار گرفته است، به‌طوری‌که روشی جدید در زمینه مواد چوبی محسوب می‌شود و سابقه طولانی در این زمینه وجود ندارد.

این سیستم دارای دو آنتن یکی فرستنده امواج و دیگری گیرنده امواج، منبع تولید امواج الکترومغناطیسی و یک رایانه قابل‌حمل برای پردازش داده‌ها با کمک نرم‌افزار مخصوص است که آشکارسازی سیگنال‌های دریافتی به‌صورت تابعی از زمان نمایش داده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها بر پایه تشعشع امواج EM است و بازه فرکانسی در این تکنیک از صد مگاهرتز تا چند گیگاهرتز متغیر است. انرژی این امواج که در مواد پخش می‌شود، در سطح

¹ Ground Penetrating Radar

² Electromagnetic

(امواج رادیویی، القا، مقاومت و تئوری مدارها) را می‌توان از این روابط استخراج کرد.



شکل ۱- ارسال و دریافت امواج توسط آنتن‌های رادار نفوذی زمین [۱۳]

سیگنال‌های منتشرشده در این روش بدین صورت است (شکل ۱):

S_1 : سیگنال انتشار مستقیم موج (مستقیماً از فرستنده به گیرنده)؛

S_2 : سیگنال منعکس شده از ناهمگنی؛

S_3 : سیگنال منعکس شده از سطح مشترک دو ماده با ضریب دی‌الکتریک متفاوت؛

S_4 : سیگنال منعکس شده از سطح مشترک ماده ۲ و هوا

S_5 : سیگنال منکسر

GPR روشی امیدوارکننده برای ارزیابی رطوبت در ساختار تیرها و تشخیص مراحل اولیه پوسیدگی شناخته شد [۱۱]. با توجه به گذردهی الکتریکی بالای آب، رطوبت داخل تیر باعث کاهش سرعت، میرایی و پراکندگی سیگنال‌های راداری می‌شود و در صورتی که ضخامت نمونه تیر معلوم باشد چنین تغییراتی می‌تواند برای شناسایی حضور رطوبت و تخمین مقدار آب موجود مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. مطالعه روی یک تیر ساختمان تاریخی با استفاده از روش GPR نشان داد که سرعت ظاهری موج در انتهای صدمه‌دیده تیر که دارای مقطع عرضی کاهش یافته است افزایش می‌یابد [۱۷].

از این تکنیک برای ارزیابی خواص دی‌الکتریک ۱۲ گونه تجاری چوب اسپانیا در رطوبت تعادل با توجه به جهت الیاف و دانسیته چوب [۱۰] و همچنین به‌عنوان سیستم آنلاین در کارخانه چوب‌بری برای افزایش بهره‌وری و بازدهی استفاده گردید [۲۰-۱۸] در مورد اخیر مشخص گردید که شناسایی عمق و موقعیت معایب در گرده‌بینه‌ها

برای نمایش داده‌های GPR لازم است روی داده‌های خام، پردازش‌های مناسب صورت گیرد تا تصاویری با وضوح مناسب در اختیار قرار دهد. به‌عنوان مثال سیگنال‌های رادار پس از انتشار در درون ماده به‌سرعت میرا می‌شوند. سیگنال‌های بازتابی از عمق‌های بیشتر در مقایسه با سیگنال‌های بازتابی از عمق‌های نزدیک به سطح بسیار ضعیف‌تر هستند که با به‌کارگیری یک تابع تقویت وابسته به زمان نتایج بهبود می‌یابند که به پردازش Gain معروف است. همچنین مهاجرت^۱ پردازشی است که جهت انتقال نقاط بازتاب به محل واقعی خود به کار گرفته می‌شود. پس از اعمال این پردازش، شکل واقعی به دست می‌آید. البته پردازش مهاجرت نیازمند داشتن دانشی از ساختار سرعت است. گذردهی الکتریکی نسبی چوب در سطوح مختلف رطوبتی و با دو روش مستقیم (با فاصله متغیر آنتن‌های فرستنده و گیرنده) و موج بازتابش (با فاصله ثابت بین آنتن‌ها) مورد بررسی قرار گرفت و در کل روش

^۱ Migration

تحقیقاتی شصت کلا در گرگان تهیه و بعد از حذف پوست به تخته‌های چهارتراش به ابعاد ۸*۱۵*۶۰ سانتیمتر تبدیل شدند. به منظور حذف عوامل تأثیرگذار بیرونی و نامشخص به‌طور مصنوعی حفره‌هایی به قطر ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و به طول‌های ۳ و ۶ سانتی‌متر در ضخامت نمونه‌ها (در سطح مماسی) و نیز دو شکاف به طول ۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ و ۶ میلی‌متر در دو انتهای نمونه‌ها (مطابق شکل ۲) که دارای رطوبت بالا (سبز) بودند ایجاد شد تا نقش معایب داخلی در نمونه‌ها را ایفا کند. میانگین رطوبت نمونه‌های راش، ممرز و توسکا به ترتیب ۶۳، ۶۸ و ۸۵ درصد بودند. نمونه‌ها به جهت حفظ رطوبت در داخل کیسه‌های پلاستیکی به محل دستگاه آزمایش غیرمخرب منتقل شد. دستگاه GPR مورد استفاده، رادار نفوذی از نوع Mala CX با آنتن‌های HF و فرکانس مرکزی ۲۳۰۰ مگاهرتز بود. داده‌برداری با حرکت آنتن دستگاه روی سطح نمونه‌ها در جهت طولی انجام گرفت به طوری که جهت ارسال امواج عمود بر حفرات (معایب داخلی) ایجاد شده بود. داده‌برداری با اسکن هر نمونه در فرکانس مذکور انجام گرفت. در مرحله بعد تخته‌ها به مدت حدود سه ماه در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا رطوبت آن‌ها برای انجام داده‌برداری توسط دستگاه GPR کاهش یابد. در این حالت رطوبت نمونه‌ها تا مقدار ۱۴٪ کاهش یافت. همچنین برای انجام داده‌برداری در رطوبت پایین‌تر از رطوبت تعادل محیط، تخته‌ها در کوره چوب خشک‌کنی با شرایط ملایم خشک شدند به طوری که رطوبت آن‌ها تا به مقدار ۶٪ رسید. داده‌های برداشت‌شده در همه مراحل با نرم‌افزار Reflexw version 5.0.8 مورد پردازش قرار گرفتند. تعیین ضریب دی‌الکتریک نمونه‌ها با استفاده از زمان رفت و برگشت موج صورت گرفت. با استفاده از معادلات ۵ و ۶ سرعت امواج در نمونه و ضریب دی‌الکتریک محاسبه شدند [۱۰]:

$$v = \frac{2\sqrt{h^2 + (d_0/2)^2}}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\epsilon' = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (6)$$

مانند گره، فلزات و پوسیدگی‌ها با دقت بالا امکان‌پذیر است. فلزات موجود در گرده‌بینه‌ها به خوبی تشخیص داده شدند و گره‌ها و پوسیدگی‌ها و مناطقی که اختلاف رطوبت بالایی با سایر مناطق چوب دارد شناسایی شدند.

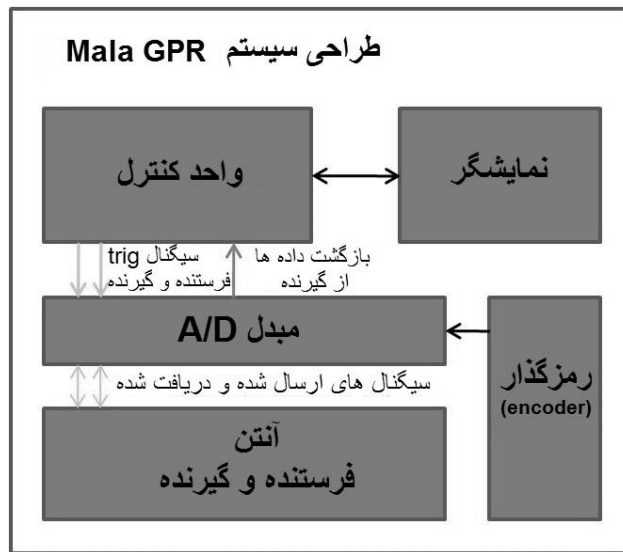
تیر چوبی یک بنای تاریخی در آزمایشگاه با استفاده از روش GPR از نظر حضور گره‌ها، عمق و موقعیت، ترک‌ها و تغییرات ابعاد هندسی و گسترش مناطق پوسیدگی مورد مطالعه قرار گرفت. گره‌های موجود به صورت اشکال هذلولی در مقاطع رادارگرام مشخص بود [۴]. Pyakurel (۲۰۰۹) در رساله دکتری خود اسکن روی گرده‌بینه‌های استوانه‌ای و دو تراش با روش GPR انجام داد که فلزات و معایب داخلی شناسایی شدند [۱۸]. Muller و همکاران (۲۰۰۳) طی گزارشی اعلام کردند که روش GPR برای بازرسی پل‌های چوبی از نظر سوراخ‌ها و پوسیدگی مناسب است. Hernandez و همکاران (۲۰۰۰) از تصویرنگاری راداری برای اسکن تیرهای لایه‌ای از گونه دوگلاس‌فر استفاده کردند و نشان دادند که تصویرنگاری راداری توانایی شناسایی انواع حفره‌های بزرگ را دارد [۲۱].

تاکنون مطالعه‌ای در خصوص استفاده از این روش در سازه‌های چوبی در داخل کشور انجام نشده است و فن‌آوری آن بومی نشده است. هدف این مطالعه در وهله اول بررسی امکان استفاده از این روش در شناسایی معایب داخلی چوب‌های پهن‌برگ بومی ایران در رطوبت‌های مختلف و استخراج پارامترهای فنی لازم در این زمینه و در وهله دوم بومی‌سازی و توسعه این تکنیک در داخل کشور در زمینه سازه‌های چوبی است.

مواد و روش‌ها

تعداد ۳ عدد گرده‌بینه سالم و فاقد پوسیدگی از هر یک از گونه‌های راش، ممرز و توسکا به قطر تقریبی ۴۰-۵۰ سانتی‌متر (در مجموع ۹ گرده‌بینه) از جنگل آموزشی-

v : سرعت امواج در نمونه
 h : ضخامت نمونه
 d_0 : فاصله آنتن‌های فرستنده و گیرنده
 t : زمان رفت و برگشت موج
 c : سرعت نور در هوای آزاد
 ϵ' : ضریب دی‌الکتریک



(الف)

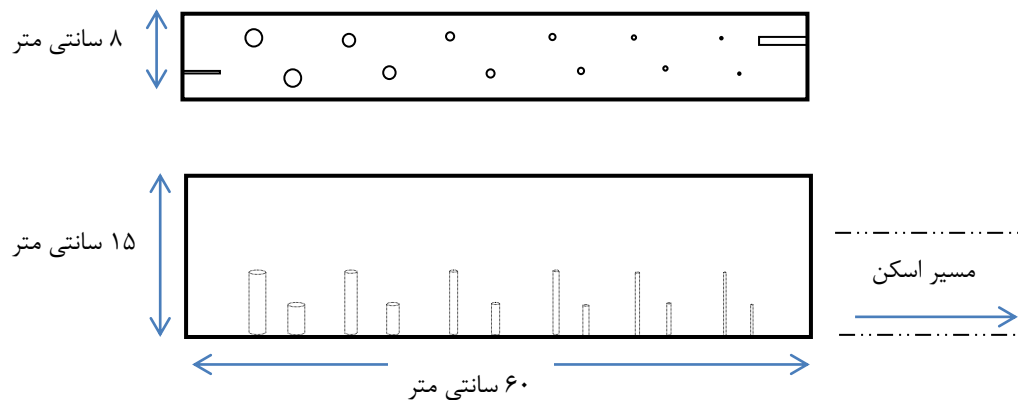


(ب)

جهت حرکت دستگاه



(پ)



شکل ۲- الف) تصویر شماییک از سیستم GPR، ب) آنتن گیرنده - فرستنده دستگاه، پ) ابعاد نمونه چوب‌های مورد آزمایش و موقعیت معایب

نتایج و بحث

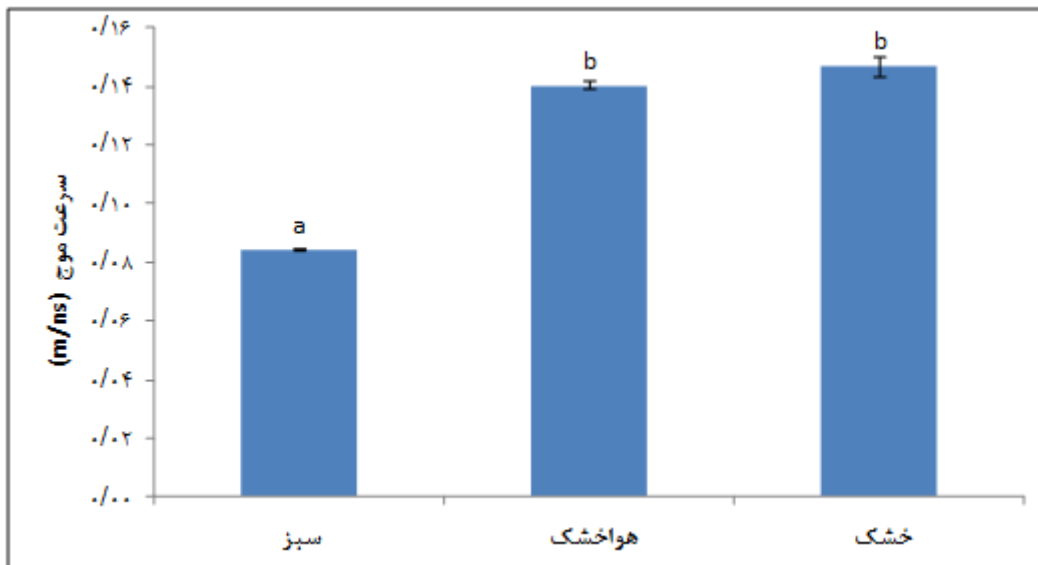
جدول ۱- سرعت موج و ضرایب دی‌الکتریک در نمونه‌های مختلف

گونه	رطوبت	ضخامت نمونه (متر)	فاصله فرستنده - گیرنده (متر)	سرعت موج در هوای آزاد (m/s)	زمان رفت و برگشت موج (ns)	سرعت موج در نمونه (m/ns)	ضریب دی‌الکتریک
راش	سبز	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۹۵	۰/۰۸۵	۱۲/۵۸
	هوا خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۱۳	۰/۱۴۰	۴/۶۱
	خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۰۵	۰/۱۴۳	۴/۳۸
ممرز	سبز	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۹۳	۰/۰۸۴	۱۲/۷۱
	هوا خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۱۹	۰/۱۳۹	۴/۶۹
	خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۱	۰/۱۵۰	۴
توسکا	سبز	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۹۰	۰/۰۸۴	۱۲/۸۴
	هوا خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۴۴	۰/۱۴۲	۴/۴۵
	خشک	۰/۰۸	۰/۰۴	3×10^8	۱/۲۲	۰/۱۴۷	۴/۱۵

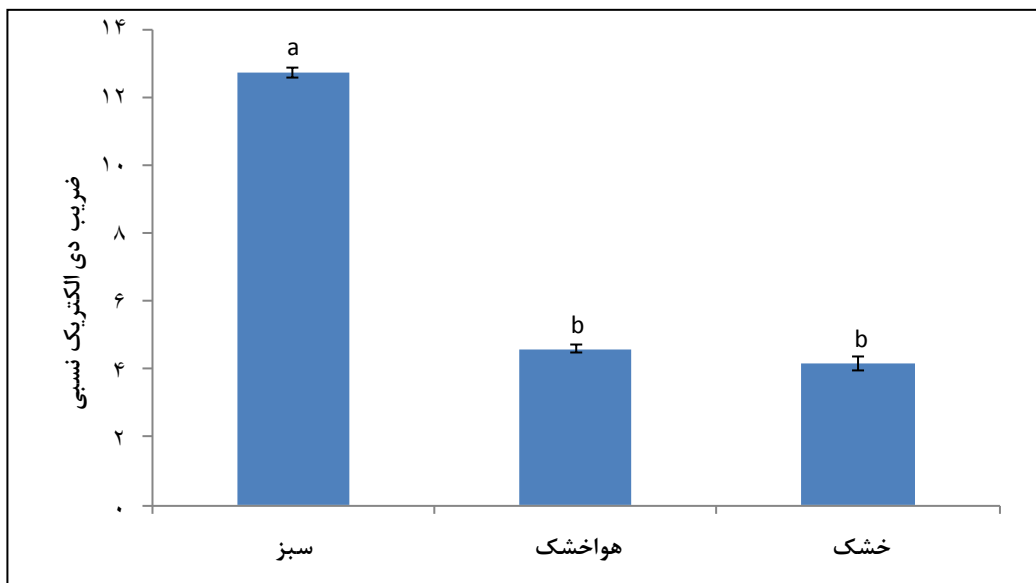
مقدار ضریب دی‌الکتریک نسبی نیز افزایش می‌یابد اما در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری بین چوب هوا خشک و خشک‌شده در کوره مشاهده نشد (شکل ۴). با افزایش رطوبت، ترکیبات قطبی دیواره سلولی و سلولز برای چرخش و حرکت آزادتر می‌شوند که باعث زیاد شدن ضریب دی‌الکتریک می‌شوند از طرف دیگر، آب دارای ضریب دی‌الکتریک بالایی است. با افزایش رطوبت و در نتیجه افزایش مقدار آب موجود داخل دیواره و حفرات چوب، ضریب دی‌الکتریک چوب مرطوب بالا می‌رود [۲۳].

افزایش ضریب دی‌الکتریک در رطوبت‌های بالای FSP توسط تعدادی از محققان از جمله Kabir و همکاران (۱۹۹۷) گزارش شده است [۲۳].

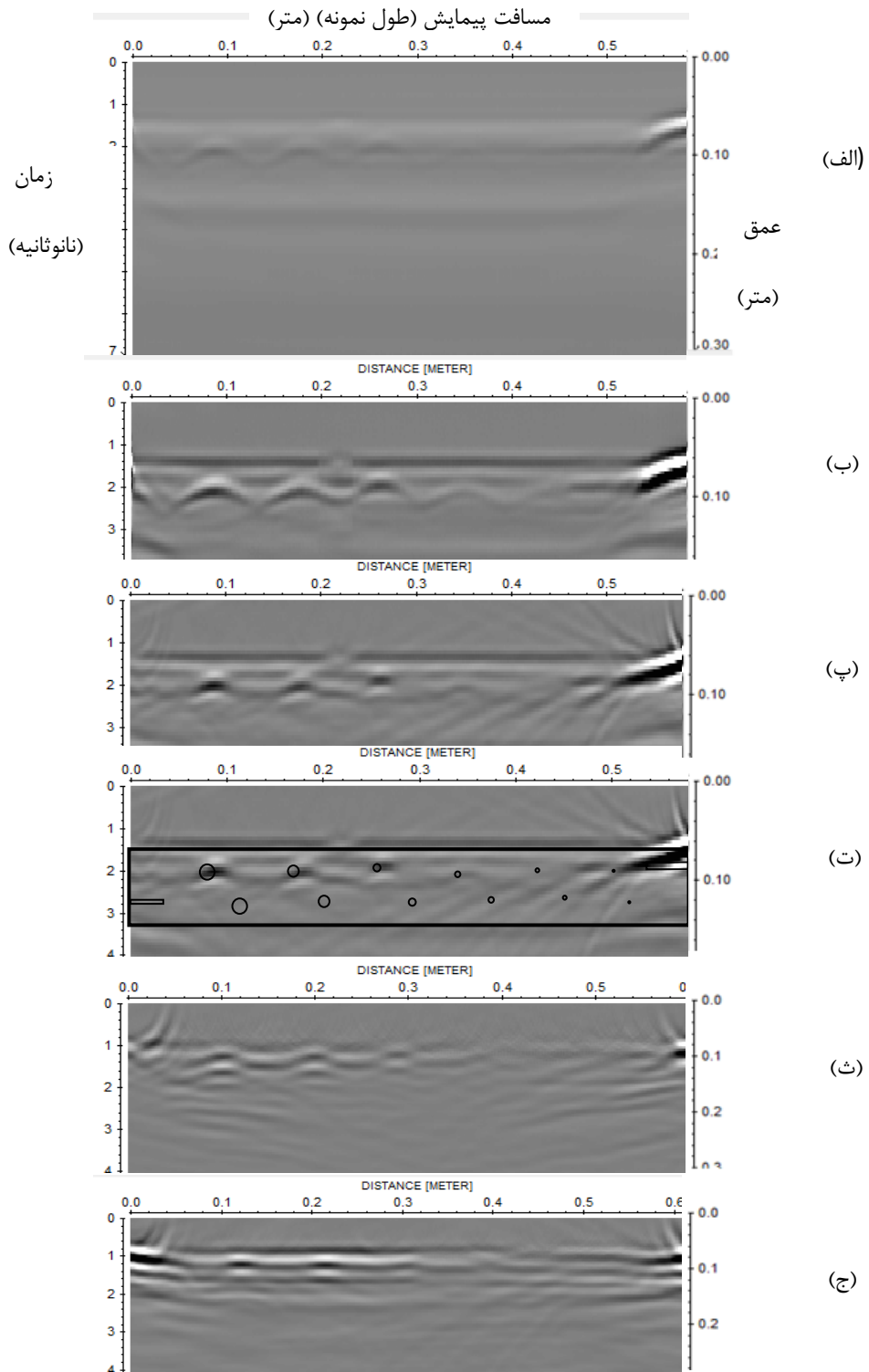
زمان رفت و برگشت موج در سیستم GPR برحسب نانوثانیه در جدول یک آمده است. با توجه به این زمان و با استفاده از معادلات مذکور مقادیر سرعت موج در نمونه‌ها و ضرایب دی‌الکتریک آن‌ها محاسبه و در جدول فوق ثبت شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت، میرایی موج نیز افزایش و سرعت موج الکترومغناطیس کاهش می‌یابد اما در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری بین چوب به رطوبت خشک‌شده در کوره با هوا خشک مشاهده نشد (شکل ۳). سرعت امواج الکترومغناطیسی در هوا ۰/۳ متر با نانوثانیه و سرعت این امواج در آب به شدت کاهش می‌یابد و به ۰/۰۳۳ متر بر نانوثانیه می‌رسد [۲۲]، یعنی با افزایش آب در محیط سرعت این امواج نیز کاهش می‌یابد. با افزایش رطوبت،



شکل ۳- تأثیر رطوبت روی سرعت امواج راداری



شکل ۴- تأثیر رطوبت روی ضریب دی الکتریک چوب

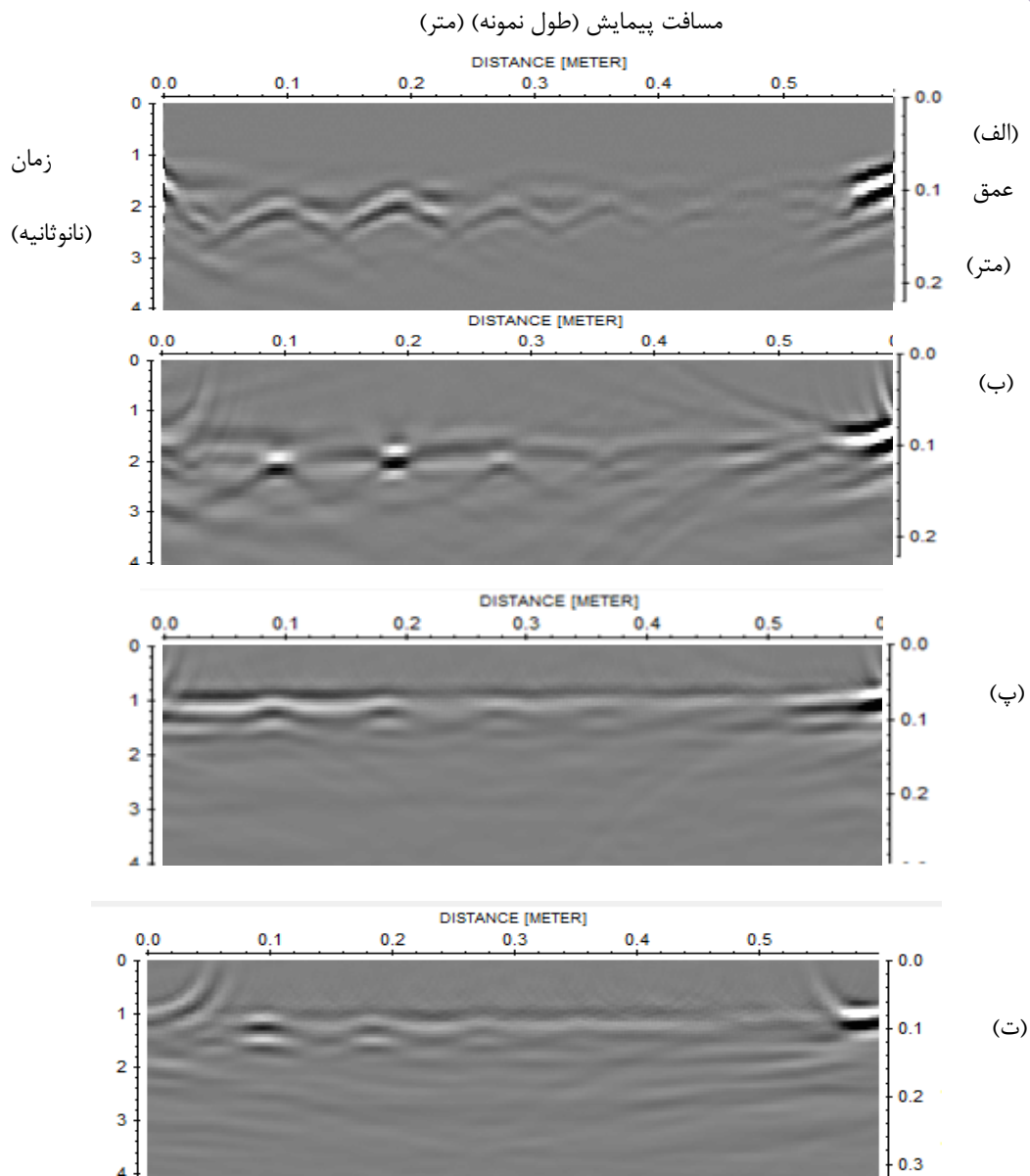


شکل ۵- الف) تصویر اولیه گونه ممرز با رطوبت سبز، ب) تصویر حاصل از پردازش‌های **Gain** و **Dewow** و **Background Removal** ممرز با رطوبت سبز، پ) ممرز با رطوبت سبز بعد از اعمال پردازش **Migration/ time -depth conversion**، ت) مشخص کردن محل معایب روی تصویر پ به صورت شماتیک، ث) گونه ممرز با رطوبت هوا خشک بعد از اعمال پردازش‌ها، ج) گونه ممرز با رطوبت خشک بعد از اعمال پردازش‌ها

رطوبت، کاهش ضریب دی‌الکتریک رخ می‌دهد (جدول ۱) در نتیجه اختلاف ضریب دی‌الکتریک بین معایب (حفره‌های پر شده با هوا) و محیط اطراف (نمونه چوب) کم می‌شود. از آنجایی که اساس کار GPR بر مبنای اختلاف ضرایب دی‌الکتریک دو محیط استوار است هر چه این اختلاف بیشتر باشد وضوح تصاویر بیشتر است؛ بنابراین با کاهش رطوبت، وضوح تصاویر نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۶ تصاویر حاصل از پردازش داده‌برداری با GPR را در چوب راش نشان می‌دهد. حفره‌های ایجاد شده به طول ۶ سانتی‌متر و قطرهای ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متری به صورت هذلولی در شکل ۶ الف برای نمونه آزمایشی با رطوبت سبز قابل مشاهده هست هر چند حفرات کوچک‌تر با وضوح کمتری دیده می‌شوند. در شکل ۶-ب نیز پردازش مهاجرت صورت گرفته و ابعاد و موقعیت معایب به‌طور تقریبی قابل مشاهده شده است. مدت زمان رفت و برگشت موج به داخل نمونه کمتر از ۲ نانوثانیه است. شکل ۶ پ و شکل ۶ ت تصاویر داده‌های برداشت شده از چوب راش را در رطوبت هوا خشک و خشک شده در کوره نشان می‌دهد که به‌مانند گونه قبلی، کیفیت و وضوح تصاویر در رطوبت‌های پایین، کمتر است. با کاهش رطوبت، مقدار ضریب دی‌الکتریک نسبی در این گونه، از ۱۲/۵۸ به ۴/۳۸ می‌رسد (جدول ۱) که این میزان کاهش باعث کاهش وضوح تصاویر نیز شده است.

شکل ۵ تصویر داده‌های برداشت شده از چوب ممرز با درصد رطوبت سبز را نشان می‌دهد. تصاویر بالا از داده‌های خام (شکل ۵ الف) و شکل‌های (۵ ب) و (۵ پ) بعد از پردازش‌های با نرم‌افزار مذکور به دست آمده است. شکل ۵ ت هم همان تصویر پردازش شده نهایی (شکل ۵ پ) است که معایب نمونه چوب از نظر ابعاد و موقعیت به صورت شماتیک روی آن قرار داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ب مشاهده می‌شود ناهنجاری‌ها و معایب داخلی نمونه به صورت هذلولی‌هایی مشخص است که این هذلولی‌ها بعد از اعمال پردازش مهاجرت، به شکل واقعی معایب نزدیک می‌شوند. حفراتی که طول آن‌ها ۶ سانتی‌متری و قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متری هستند به وضوح و حفره ۶ میلی‌متری با وضوح کمتر قابل تشخیص است اما در همه نمونه‌ها هیچ‌کدام از حفره‌هایی که طول آن‌ها ۳ سانتی‌متر بود (حفره‌های ردیف پایین) تشخیص داده نشد که می‌توان گفت احتمالاً به علت شکل آنتن و مسیر نمونه‌برداری بوده که حفرات ۳ سانتی‌متری در محدوده امواج ارسالی دستگاه قرار نگرفتند. شکاف ایجاد شده در انتهای سمت راست نمونه نیز قابل مشاهده است. همچنین محدوده نمونه (زمان رفت و برگشت موج) تقریباً بین ۱/۵ تا ۳/۵ نانوثانیه است. در شکل ۵ ث چوب ممرز با رطوبت هوا خشک و شکل ۵ ج تصویر گونه ممرز برای نمونه خشک شده در کوره است که معایب آن‌ها وضوح کمتری از نمونه چوب سبز دارند. در اثر کاهش

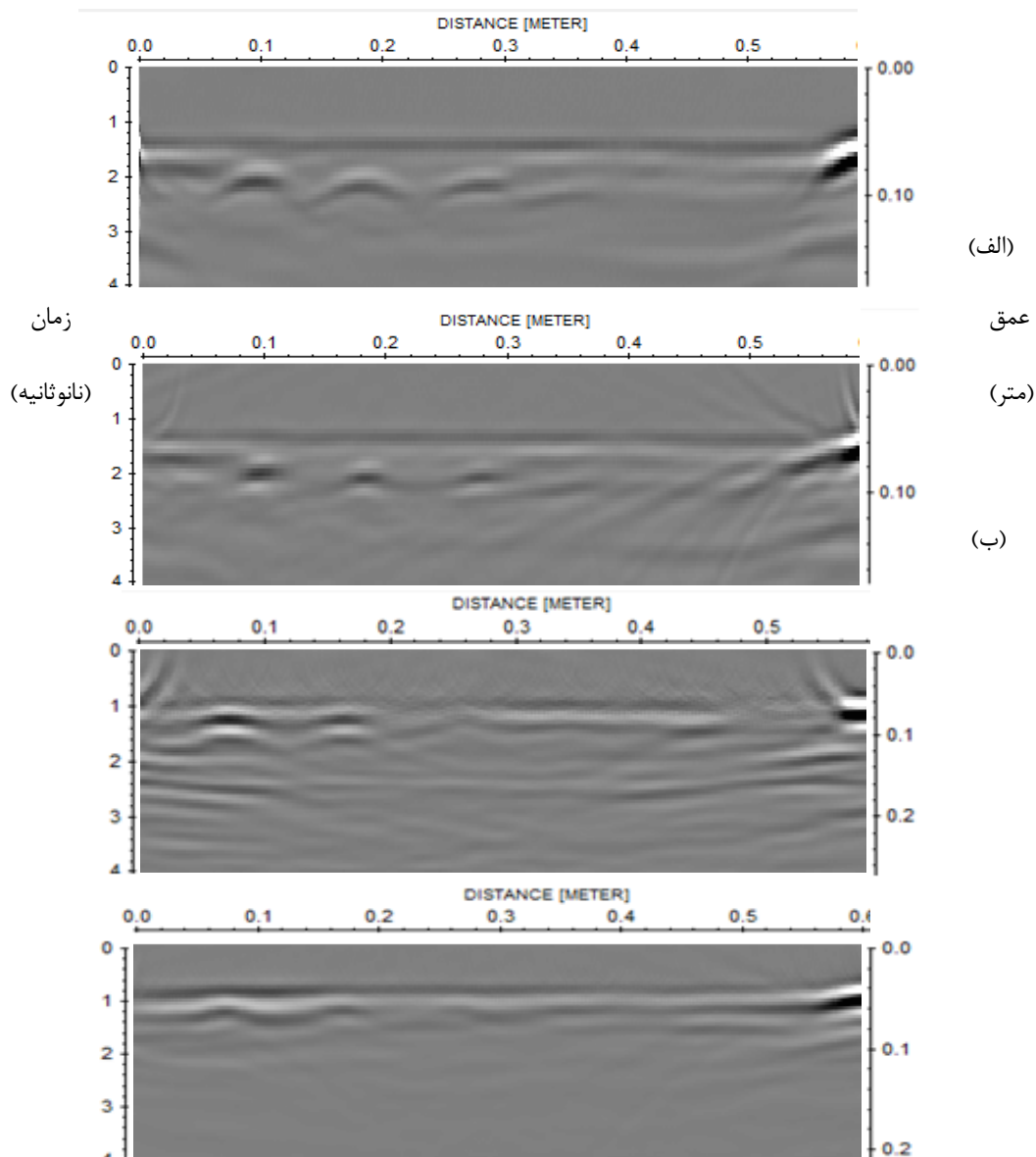


شکل ۶- الف) تصویر حاصل از پردازش‌های **Gain** و **Dewow** و **Background Removal** در گونه راش با رطوبت سبز، ب) بعد از اعمال پردازش **Migration/ time –depth conversion** در گونه راش با رطوبت سبز، پ) تصویر گونه راش با رطوبت هوا خشک بعد از اعمال پردازش‌ها، ت) تصویر گونه راش با رطوبت خشک بعد از اعمال پردازش‌ها

می‌دهد. مشابه گونه‌های دیگر با کاهش رطوبت و در نتیجه کاهش ضریب دی‌الکتریک (جدول ۱)، وضوح تصاویر نیز کاهش یافته است. شکل ۸ دامنه موج را در رطوبت بالا و خشک به ترتیب در سه گونه راش، ممرز و توسکا را نشان می‌دهد که در رطوبت بالا، تضعیف دامنه امواج بیشتر بوده است.

شکل ۷ الف و ب تصاویر حاصل از برداشت داده‌های GPR در چوب توسکا را در رطوبت سبز بعد از پردازش نشان می‌دهد. حفره‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متری با وضوح خوبی در تصویر مشاهده می‌شود. شکل‌های ۷ پ و ۷ ت تصاویر پردازش‌شده حاصل از داده‌برداری با GPR از چوب توسکا را در رطوبت‌های هوا خشک و خشک نشان

مسافت پیمایش (طول نمونه) (متر)

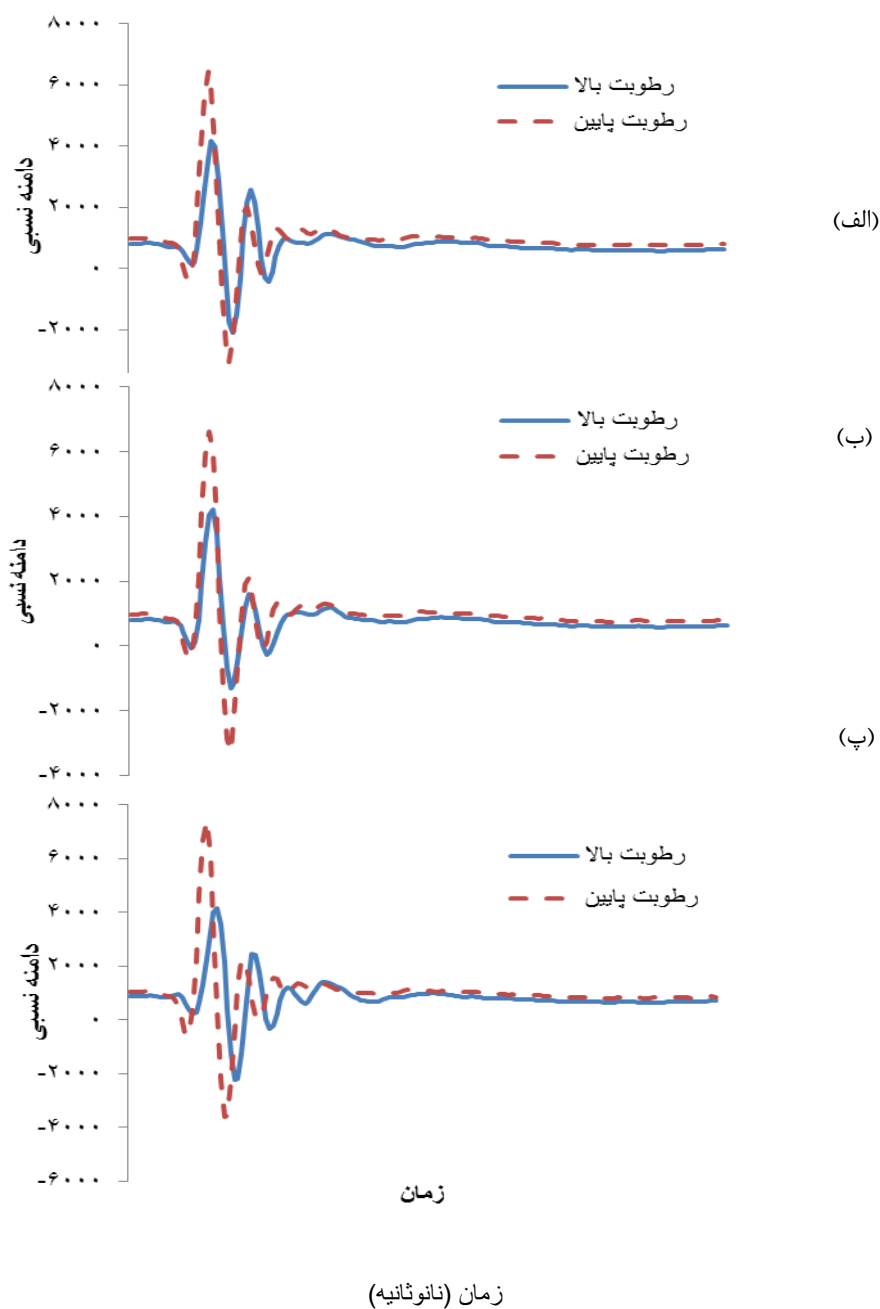


شکل ۷- الف) تصویر حاصل از پردازش‌های **Dewow** و **Gain** و **Background Removal** در گونه توسکا با رطوبت سبز، ب) بعد از اعمال پردازش **Migration/time - depth conversion** در گونه توسکا با رطوبت سبز، پ) تصویر گونه توسکا با رطوبت هوا خشک بعد از اعمال پردازش‌ها، ت) تصویر گونه توسکا با رطوبت خشک بعد از اعمال پردازش‌ها

اما معایب کوچک‌تر از ۶ میلی‌متر در هیچ‌کدام از نمونه‌ها شناسایی نشد. لذا این روش برای شناسایی حفره‌های بزرگ ناشی از پوسیدگی‌ها در چوب‌ها و حفره‌های نسبتاً بزرگی که برخی حشرات (مانند سرامبیسیده‌ها که لارو آن‌ها حفراتی به اندازه ۶ تا ۱۰ میلی‌متر و بیشتر در چوب سوزنی‌برگان و یا بوستریکیده‌ها که حفراتی به اندازه ۲ تا

نتیجه‌گیری

سیستم GPR توانایی شناسایی معایب داخلی چوب‌های پهن‌برگ بومی ایران مورد مطالعه در این تحقیق را داراست. این سیستم، روشی ایمن، سریع و با دقت مناسب برای شناسایی معایب عمل می‌کند و در شناسایی اندازه تقریبی معایب و موقعیت آن‌ها عملکرد خوبی دارد



شکل ۸ - دامنه موج در الف) چوب ممرز، ب) چوب راش، و پ) چوب توسکا در رطوبت بالا و رطوبت پایین

راداری سریع‌تر میرا می‌شوند و امواج، دارای دامنه نوسان کمتری هستند. همچنین به علت بالا بودن ضریب شکست آب نسبت به هوا، افزایش رطوبت باعث کاهش سرعت موج الکترومغناطیسی می‌شود [۱۳]. چوب‌های مرطوب به علت امکان چرخش آزادانه مولکول‌های قطبی و سلولز دیواره سلولی و نیز بالا بودن ضریب دی‌الکتریک آب، دارای

۱۰ میلی‌متر هم در چوب سوزنی‌برگان و هم چوب در پهن‌برگان را باعث می‌شوند) ایجاد می‌کنند می‌تواند کاربرد داشته باشد. به نظر می‌رسد دانسیته متفاوت گونه‌ها تأثیری روی وضوح تصاویر و قدرت تفکیک سیستم نداشته است اما نیاز به مطالعات بیشتر در این زمینه وجود دارد. در چوب‌های گونه‌های مختلف با رطوبت بالا، امواج

نمونه‌های آزمایش، حفرات موجود در نمونه‌ها با هوا پر شده، در نتیجه در چوب‌های با رطوبت بالا با توجه به افزایش اختلاف ضریب دی‌الکتریک چوب مرطوب نسبت به هوا، تصاویر به دست آمده برای شناسایی حفرات (به شرطی که حفرات با آب پر نشده باشند) وضوح بهتری نسبت به چوب‌های خشک خواهند داشت.

ضریب دی‌الکتریک بالاتری هستند [۱۰]، اگر اختلاف دی‌الکتریک بین دو ماده بالا باشد ضریب بازتابش زیاد می‌شود و بازتاب قوی می‌دهد [۱۱]. با توجه به این که این سیستم هم بر اساس اختلاف ضریب الکترونیک دو محیط عمل می‌کند و هر چه این اختلاف بیشتر باشد تفکیک معایب بهتر صورت می‌گیرد. ضریب دی‌الکتریک هوا را ۱ و ضریب دی‌الکتریک آب را تقریباً ۸۰ در نظر می‌گیرند. در

منابع

- [1] Saadatnia, M., Eshaghi, S. and Rostampour, A., 2015. Nondestructive evaluation of acoustical and mechanical properties of bagasse fiber composites by flexural vibration method (Lohe Sabz & Karoon factories). Iranian journal of wood and paper industries, 6(1):217-226. (In Persian).
- [2] Chlaib, H.K., Abdalnaby, W. and Abdalnaby, N., 2014. Application of the ground penetrating radar to detect weapons caches and unexploded ordnance laboratory experiments. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics. 2(5): 41-50.
- [3] Martin, M., 2010. Detecting various burial scenarios in a controlled setting using ground-penetrating radar and conductivity. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Arts in the Department of Anthropology in the College of Sciences at the University of Central Florida Orlando, Florida, 182p.
- [4] Colla, C., 2009. GPR of a timber structural element. 13th International conference On ground penetrating Radar, June 21-25, Lecce, Italy.
- [5] 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.
- [6] Dinh, K., Gucunski, N., Kim, J. and Duong, T.H., 2016. Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks. NDT & E International, 83: 48-58.
- [7] Rodés, J.P., Pérez-Gracia, V. and Martínez-Reguero, A., 2015. Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment. Construction and Building Materials, 96: 181-188.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I. Diez Barra, R. and Capuz-Lladró, R., 2013. Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. Construction and Building Materials 38: 903-911.
- [11] Reci, H. Mai, T.C., Sbartaï, Z.M., Pajewski, L. and Kiri, E., 2016. Non-destructive evaluation of moisture content in wood by using Ground Penetrating Radar. Geoscience Instrument Method Data System, 5: 575-58.
- [12] Riggio, M., Ronald, W.A, Augelli, F., Kasal, B., Lechner, T. and Muller, W., 2013. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. Materials and Structures, 47(5): 749-766.

- [13] Sbartai, M.Z., 2011. Ground Penetrating Radar. In Situ Assessment of Structural Timber .RILEM State of the Art Reports, 7: 25-37.
- [14] Sbartai, Z.M., Bos, F. and Breyse, D., 2010. NDE of timber structures using GPR. In Structural Faults & Repair. Springer Series in Wood Science. 128p.
- [15] Mai, T.C., Razafindratsima, S., Sbartai, Z.M., Demontoux, F. and Bos, F., 2015. Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency. Construction and Building Materials, 77: 213–217.
- [16] Redman, J.D., Hans, D. and Diamanti, N., 2016. Effect of wood log shape on moisture content measurement using GPR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(1): 221-227.
- [17] 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. 8th international conference on structural analysis of Historical constructions, Oct 15-17, Wroclow Poland.
- [18] Pyakurel, S., 2009. 2D and 3D GPR imaging of wood and fiber reinforced polymer composites. Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. West Virginia University.
- [19] Muller, W., 2003. Timber girder inspection using ground penetrating radar. Institute of Public Works Engineering Australia (IPWEA) Queensland Division, State Conference, oct 6-10, Noosa Lakes, Queensland, Australia.
- [20] Lualdi, M., Zanzi, L., 2002. GPR investigations to reconstruct the geometry of the wooden structures in historical buildings. GPR investigations to reconstruct the geometry of the wooden structures in historical buildings. Ninth International Conference. Apr. 12. China.
- [21] Hernandez J. and Duwadi, S., 2000. A nondestructive impulse radar tomographic imaging system for timber structures. Public Roads, 64(3): 39-43.
- [22] Şahin kol, H., 2009. Thermal and dielectric properties of pine wood in the transverse direction. BioResources, 4(4):1663-1669.
- [23] Kabir, M.F., Khalid, K., Daud, W.M. and Aziz, S.,H.,A., 1997. Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line. Wood Fiber Science, 29: 319-324.

Application of GPR technique in evaluation of internal defects in hardwood species

Abstract

Non-destructive testing of materials to assess their properties is continuously developing. Ground penetrating radar (GPR) as a non-destructive method is based on the transmission of electromagnetic energy and recently has been applied in field of wood and wood products. In this study, GPR technique was used to evaluate the internal defects in three hardwood species with three moisture content levels. In order to remove determinant extrinsic and uncertain factors, several artificially defects were created within the wood samples. Data collection was done by MALA CX GPR in center frequency of 2300 MHz and processed with Reflexw software. This study showed that dielectric properties on wet-woods are more than dry-woods and internal defects can better be detected in wet wood than dry woods. However, the holes with diameters of 4 mm and less were not detectable. In general, GPR, as a safe and portable method, is capable for detecting internal defects and voids in hardwood.

Keywords: non-destructive test, ground penetrating radar, internal defects of woods, dielectric properties.

M. Madhoushi^{1*}

H. Hatefnia²

Gh. Ebrahimi³

N.Amini⁴

¹ Associate Prof., Department of wood engineering and technology, Gorgan university of agricultural sciences and natural resources, Gorgan, Iran

² PhD student, Department of wood engineering and technology, Gorgan university of agricultural sciences and natural resources, Grgan, Iran

³ Professor, Department of wood and paper sciences and technology, College of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Assistant Prof., Institute of geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding author:

madhoushi@gau.ac.ir

Received: 2016/10/18

Accepted: 2016/12/20