

# مطالعات آزمایشگاهی کاربرد GPR در ردیابی خرابی های اجرائی محل تماس دو لایه در یک روسازی مرکب

فرزین فاروقی<sup>۱</sup>

## چکیده

برای بررسی امکان استفاده از سیستم رادار زمین شناسی به عنوان یک روش نوین و غیر مخرب در کنترل کیفیت روسازی راهها و عرشه پلها، مطالعات آزمایشگاهی بر روی محل اتصال دو لایه بتن آسفالت قیری و بتن سیمانی مگر انجام شده است. در محل اتصال دو لایه، یک لایه میانی با مصالح و ضخامت های مختلف (نشان دهنده اتصال سالم یا تخریب شده) شبیه سازی شده است. در پایان تاثیر حالت های مختلف خرابی بر روی امواج الکترومغناطیسی بازگشتی از آنها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که جنس و ضخامت لایه میانی تاثیر معنی داری بر روی شدت موج و زمان دریافت سیگنال های بازگشتی از این میان لایه ها دارد. همچنین نتیجه مطالعات نشان می دهد که به کمک روش یاد شده می توان با دقت قابل توجهی یک میان لایه سالم را از یک محل تماس تخریب شده تفکیک نمود، به شرطه بر آنکه خرابی در نتیجه تغییر شکلهای کوچک و یا لهیدگی موضعی لایه ها نباشد. از طرف دیگر، برای یک محل تماس تخریب شده، می توان طبیعت مصالح آن را با توجه به تجزیه و تحلیل سیگنالی پیش بینی نمود.

## کلمات کلیدی

روسازی، خرابی میان لایه، روش غیر مخرب، رادار زمینی، تحقیقات آزمایشگاهی.

## *Laboratory Studies for Detecting the Constructional Interface Defaults in a Composite Pavement by GPR*

F. Farooghi

### ABSTRACT

For the possibility of GPR utilization (as a non-destructive and new method for pavement and bridge deck quality control), experimental approaches are used to characterize the interface between two layers of lean concrete and bituminous. Between these two layers, an intermediate layer with different thicknesses and natures is supposed to determine an intact interface from damage one. Therefore, the influence of different kind of damage on the electromagnetic waves reflected from the interfaces is estimated. The results of studies show that the thickness and the media nature of the interface have an important influence on the amplitude and on the time of the signals that reflected from the interface. These studies also illustrate that by the radar, an in

tact interface from a damage one can be differentiated, provided that, there is no small deformation and bearing failure of layers. Moreover, for a damage interface, the interface nature can be recognized with signal analysis.

### KEYWORDS

Pavement, Interface damage, Non-Destructive testing, Ground Penetrating Radar, Experimentation.

<sup>۱</sup> استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، f.farooghi@uok.ac.ir

ها در طول مدت خدمت رسانی یک سازه روسازی ست. این مطالعات در آزمایشگاه و بر روی یک نمونه روسازی مرکب متشکل از یک رویه آسفالت قیری و یک رویه بتن سیمانی مگر انجام شده است.

## ۲- اصول عمومی و تئوریک

اساس کار یک سیستم رادار GPR، بر ارسال امواج الکترومغناطیس توسط یک آنتن فرستنده و دریافت امواج بازگشتی از موانع مختلف توسط یک آنتن گیرنده منطبق است. با توجه به خاصیت امواج الکترومغناطیس، بازگشت یک موج ارسالی می‌تواند از محل تماس دو لایه، و یا از قسمتهای مختلف یک لایه روسازی با مشخصات الکترومغناطیس مختلف صورت پذیرد. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که امواج فرستاده شده سایر لایه‌ها را قطع کنند و به سمت گیرنده هدایت شوند و یا به لایه‌های عمقی نفوذ کرده و انرژی اولیه مستهلک گردد.

مجموع امواج دریافتی توسط گیرنده و تجزیه و تحلیل آنها توسط مغز الکترونیکی رادار، باعث ثبت یک تصویر الکترونیکی از درون لایه‌های سازه مورد نظر می‌گردد. این تصویر در روی محور افقی مقدار انرژی امواج بازگشتی یا بعبارت دیگر ولتاژ آنها و در روی محور قائم زمان رفت و برگشت امواج الکترومغناطیس را نشان می‌دهد.

سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در یک محیط زمین شناسی تابعی از سرعت نور در خلاء و خواص الکترومغناطیس مصالح است. برای مصالح لایه‌های روسازی راه سرعت انتشار امواج  $V$  از رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

که در آن  $c$  سرعت نور در خلاء و  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک مصالح لایه‌های روسازی است.

مصالح روسازی راه بخشی از مصالح غیر فلزی محسوب می‌گردند و در نتیجه در اندرکنش با امواج الکترومغناطیسی مقاومت حداقلی را از خود نشان داده و مقدار افت انرژی الکترومغناطیس در این محیط‌ها ناچیز است. رابطه سرعت به شکل ساده‌یاد شده بیان می‌گردد.

طول موج  $\lambda$  سیگنالهای بازگشتی نشان دهنده مسافت طی شده توسط امواج الکترومغناطیس در واحد زمان در هنگام انتشار در داخل لایه‌های روسازی است. این طول موج تابعی از سرعت انتشار امواج در لایه‌ها  $V$  و فرکانس آنها  $f$  است.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (3)$$

از رابطه (۴) می‌توان میزان دقت تفکیک دو سیگنال متوالی

استفاده از امواج الکترومغناطیس به کمک رادار زمین شناسی دراکتشاف کیفیت مواد و مصالح موجود در لایه‌های زیر سطح زمین قدمتی ۷۰ ساله دارد. در طول دهه‌های گذشته امکان استفاده از این روش بطور گسترده در علوم کشاورزی، معدن، زمین شناسی، آبهای زیر زمینی، محیط زیست و باستان شناسی بکار گرفته شده و در موارد زیادی نتایج قابل قبولی کسب شده است. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.

در گرایش مهندسی عمران کاربرد این ابزار که در گروه ابزارهای غیر مخرب در کنترل کیفیت سازه‌ها شناخته می‌شود قدمتی ۳۰ ساله دارد. از مهمترین کاربردهای آن می‌توان به تعیین موقعیت لوله‌های آب و فاضلاب و کابل‌های مدفون در زیر خاک اشاره کرد. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.

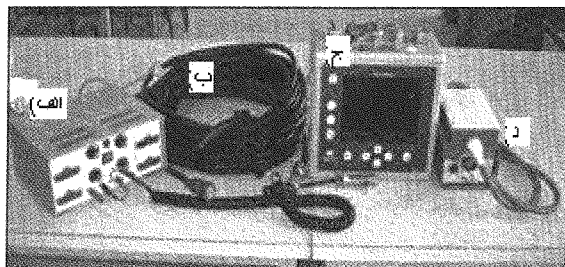
در زمینه روسازی راه‌ها، تحقیقات قابل توجهی در حال انجام است. مهمترین زمینه‌های این مطالعات عبارتند از: تعیین ضخامت لایه راه‌ها، تعیین میزان خلل و فرج موجود در دال پلها، میزان خوردگی آرماتور در دالهای بتن آرمه و یا تعیین رطوبت بتن در یک سازه بتنی. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.

برای استفاده از سیستم رادار در کنترل کیفیت و کمیت یک سازه یا المان سازه‌ای در اغلب موارد ضروری است پارامترهای الکترومغناطیس این قطعات معلوم باشند. لذا بخش قابل توجهی از تحقیقات انجام شده صرف تعیین این پارامترها شده است [۹]، [۱۰].

استفاده از این فن آوری دارای مزایای قابل توجهی است، مهمترین آنها عبارتند از: غیر مخرب بودن روش، سرعت بالای وسیله نقلیه حامل دستگاه در هنگام ثبت اطلاعات (تا سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت)، جمع آوری اطلاعات بدون انسداد ترافیکی راه و جمع آوری پیوسته اطلاعات در طول مسیر راه.

با توجه به مطالب یاد شده اغلب محققان در پی بکارگیری این روش در حل مسائل موجود و مطرح در مهندسی راه و ساختمان و بخصوص در بخش راهسازی و روسازی راه‌ها می‌باشند. Error! Reference source not found. [۱۰]. هدف این مطالعات عبارت است از بررسی امکان استفاده و کاربری این روش در اکتشاف و نمایش خرابی محل تماس لایه‌های روسازی راه و یا بعبارت ساده تر تعیین وضعیت این میان لایه

گیرنده فاصله ۵٫۸ سانتیمتری از هم تعبیه شده است. با توجه به اینکه محدوده فرکانسی این رادار مقادیر بالائی را شامل می‌شود، لذا انرژی ارسالی خیلی زود مستهلک شده و عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس ساطع شده توسط آن به کمتر از یک متر محدود می‌گردد.

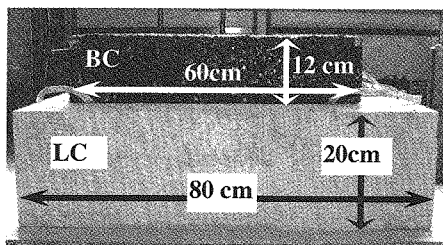


شکل (۱): دستگاه رادار: (الف) سیستم تغذیه ۱۲ ولت، (ب) کابل کوکسیال، (ج) واحد مرکزی، (د) ژنراتور، سیستم الکترونیکی و آنتن های گیرنده و فرستنده

در این فن آوری، سیستم ثبت داده ها قادر به حذف اغتشاشات مزاحم، با اعمال فیلترهای افقی و قائم بر روی امواج دریافتی است. همچنین برای اصلاح نسبت سیگنال به اغتشاش داده‌ها، هر سیگنال نهائی از میانگین ۳۲ سیگنال ورودی بدست آمده است.

### ۳-۲- مصالح

در شکل (۲) نمونه مورد آزمایش نشان داده شده است. این نمونه آزمایشی مرکب است از یک رویه آسفالت قیری به ابعاد ۱۲×۴۰×۶۰ سانتیمتر مکعب که بر روی یک لایه بتن سیمانی مگر به ابعاد ۲۰×۶۰×۸۰ سانتیمتر مکعب تعبیه شده است. این نوع روسازی یکی از انواع روسازی شناخته شده در شبکه راههای کشور فرانسه متشکل از یک لایه بتن غلتکی ست که در بستر یک لایه یا دو لایه آسفالت قیری اجرا می‌گردد. در این مطالعات بجای استفاده از بتن غلتکی از بتن مگر دارای خواص الکترومغناطیسی شبیه بتن غلتکی استفاده شده است.



شکل (۲): نمونه مورد آزمایش

برای شبیه سازی یک لایه روسازی تخریب شده، از مصالح دانه ای غیر چسبیده استفاده شده است. برای این منظور در مرز تماس دو لایه یاد شده از شن و ماسه به ضخامت های

را بدست آورد. در واقع برای تشخیص و تفکیک دو سیگنال متوالی بازگشتی از دو میان لایه متوالی، می‌بایست فاصله بین آنها بیش از نصف طول موج باشد.

در مرز تماس دو لایه میزان بازگشت امواج الکترومغناطیس تابع ضرایب ثابت دی الکتریک لایه‌ها و زاویه تابش و بازتابش امواج است. در صورتیکه جهت تابش و بازتابش عمود بر سطح افق در نظر گرفته شود، مقدار انرژی بازگشتی  $\rho$  از رابطه ساده شده (۵) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (6)$$

که در آن  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  به ترتیب ضرایب ثابت دی الکتریک لایه اول و لایه دوم روسازی راه است.

با داشتن زمان رفت و برگشت امواج عبوری  $\Delta t$  از داخل یک لایه روسازی راه، از رابطه (۷) می‌توان ضخامت  $h$  لایه مورد نظر را تخمین زد.

$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot \sqrt{\epsilon}} \quad (8)$$

### ۳- تجویزات و مصالح

#### ۳-۱- تجویزات

دستگاه های رادار به دو گروه اصلی تقسیم شده است: رادار زمانی و رادار فرکانسی. در اغلب موارد رادارهای موجود بر اساس سیستم زمانی، نسبت به ذخیره اطلاعات و داده‌ها اقدام می‌نماید. در این حالت ژنراتور سیستم نسبت به تولید سیگنالهای زمانی در محدوده زمانی نانو ثانیه فعال است. رادارهای زمین شناسی موجود در بازارهای جهانی را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم نمود: رادار تزویج به زمین (رادار بطور مستقیم روی سطح زمین قرار می‌گیرد)، رادار تزویج به هوا (رادار بطور معلق و در فاصله ۴۰ سانتیمتری از سطح فوقانی زمین قرار دارد) و رادار چاهی (برای جمع آوری اطلاعات در داخل چاه ها مورد استفاده قرار می‌گیرد).

رادار تجاری مورد استفاده در تحقیق حاضر در شرکت GSSI توسعه یافته و ساخته شده است. در شکل (۱) قسمت‌های مختلف دستگاه رادار نشان داده شده است. دستگاه یاد شده از گروه اول می‌باشد، در این گروه، سیستم رادار هنگامی که بطور مستقیم روی سطح زمین قرار دارد، کارکرد مناسب تری در ثبت و ذخیره اطلاعات از خود نشان می‌دهد.

این سیستم به یک جفت آنتن فرستنده و گیرنده با فرکانس مرکزی ۱٫۵ گیگا هرتز مجهز است، و آنتن‌های فرستنده و

مختلف استفاده شده است.

در جدول (۱) ترکیبات مصالح لایه های روسازی و مصالح لایه تخریب شده ارائه شده است.

جدول (۱): ترکیبات مصالح لایه ها.

بتن مگر	بتن آسفالتی	
شپست بهمراه اکسید آهن، کوارتز و سیلیس	دیوریت	طبیعت دانه ها
(mm) ۰-۲۰	(mm) ۰-۱۴	دانه بندی
-----	٪ ۵۶ وزنی	قیر
۱۰٪ حجمی	-----	سیمان
شن	ماسه	
		طبیعت دانه ها
شپست بهمراه اکسید آهن، کوارتز و سیلیس		
(mm) ۵-۲۰	(mm) ۰-۵	دانه بندی

#### ۴- شرح مراحل انجام آزمایش

##### ۴-۱- تعیین پارامترهای الکترومغناطیس مصالح

روشهای مختلفی برای تعیین پارامترهای الکترومغناطیس مصالح وجود دارد. این روشها را می توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: روش آزمایشگاهی و روش صحرایی (روش مستقیم اندازه گیری) [۱۰].

در روشهای آزمایشگاهی، نمونه استوانه ای یا مکعبی کوچکی (مثلا به قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۲۵ میلی متر) از لایه ها یا مصالح راه برداشته شده و توسط دستگاه های خاصی (مانند استوانه تحت خلاء) مورد آزمایش قرار می گیرد. در این دستگاه، خواص الکترومغناطیس مصالح از قبیل ضریب ثابت دی الکتریک مصالح برای فرکانسهای مختلف ارسالی تعیین می گردد.

با توجه به اینکه نسبت ابعاد نمونه ها نسبت به قطر دانه بندی مصالح مورد استفاده در لایه های راه به حدود ۱ یا ۲ برابر محدود می شود، لذا بنظر می رسد که نتایج بدست آمده در این روش، نتواند بیان کننده نتایج بدست آمده در نمونه واقعی لایه های راه باشد. با این وجود بعضی از محققین [۱۰] اعتقاد دارند که خطای اندازه گیری در این روشها در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

در روش مستقیم، ثابت دی الکتریک مصالح با استفاده از خود دستگاه رادار تعیین می گردد. در این حالت مقدار انرژی بازگشتی از سطح فوقانی یا سطح تحتانی لایه ها با قرار دادن یک صفحه فلزی قابل اندازه گیری بوده و با استفاده از رابطه (۸) و سایر روابط بر گرفته از آن، مقدار ضریب دی الکتریک تعیین می گردد. البته مقادیر بدست آمده در این روش نیز تحت

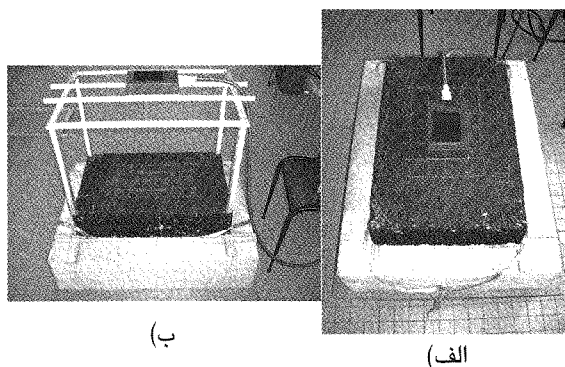
تأثیر تغییرات شدت جریان ارسالی توسط ژنراتور قرار دارد. مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای الکترومغناطیس در مطالعات حاضر در نتیجه استفاده از داده های دو روش یاد شده می باشد. در جدول (۲) مقادیر ثابت دی الکتریک مصالح مختلف ارائه شده است. گفتنی است که بیشتر از مقادیر ثابت دی الکتریک نسبی که یک پارامتر بی بعد است استفاده می شود و آن نسبت ثابت دی الکتریک مصالح به ثابت دی الکتریک هوا است.

جدول (۲): ثابت دی الکتریک مصالح.

ردیف	مصالح و مواد	ثابت دی الکتریک نسبی، $\epsilon_r$
۱	هوا	۱
۲	بتن آسفالتی	۵.۹
۳	بتن مگر	۴.۵
۴	ماسه	۲.۷
۵	شن	۱.۹
۶	ورق فلزی	۱

##### ۴-۲- موقعیت قرارگیری دستگاه رادار

برای اندازه گیری و ثبت داده ها، دو موقعیت مختلف برای دستگاه رادار در نظر گرفته شده است: الف) رادار تزویج به سطح فوقانی رویه آسفالت قیری، ب) رادار تزویج به هوا (تعبیه رادار در ارتفاع ۴۰ سانتیمتری از سطح فوقانی رویه آسفالت قیری). در شکل (۳) این دو حالت نمایش داده شده است.



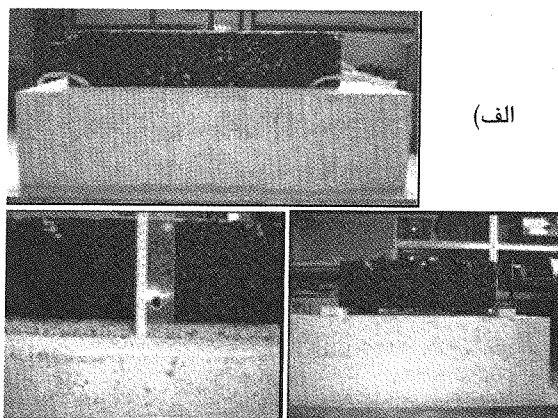
شکل (۳): موقعیت های قرارگیری رادار: الف) رادار کویل شده با سطح فوقانی دال آسفالتی، ب) رادار کویل شده به هوا

به منظور تعبیه رادار در ارتفاع مورد نظر از یک چهار پایه چوبی استفاده شده است. تأثیر امواج بازگشتی از این پایه ها بر روی اطلاعات ثبت شده از یک آنتن معلق مطالعه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که وجود پایه های چوبی، هیچگونه اغتشاشی بر روی سیگنالها و امواج بازگشتی و دریافتی از سازه اصلی ایجاد نمی کند.

با توجه به شرایط مختلف محل تماس دو لایه روسازی، نمونه آزمایشگاهی فرض شده است: الف) محل تماس سالم یا تخریب نشده، ب) محل تماس تخریب شده با در نظر گرفتن یک لایه هوا در بین دو لایه قیری و سیمانی (ایجاد درز در بین لایه ها بدون وجود خرابی در خود لایه ها)، ج) محل تماس تخریب شده از جنس ماسه یا شن (ناشی از تخریب روسازی سیمانی). در شکل (۴) سه حالت فوق نشان داده شده است.

شایان گفتن است که خرابی یک سازه روسازی راه می تواند به دلایل مختلف اتفاق افتد. در این مطالعات دو حالت مختلف خرابی در نظر گرفته شده است. در حالت الف) فرض بر آن است که هر دو لایه روسازی سالم هستند و خرابی روسازی ناشی از عدم اتصال مناسب لایه هاست. در حالت ج) فرض بر آن است که یکی از لایه های روسازی در مقابل بارهای خارجی نتوانسته وظیفه اصلی خود را انجام دهد و چسبندگی میان دانه های از بین رفته که این حالت در رویه های بتن غلتکی بیشتر رخ می دهد. ضخامتهای در نظر گرفته شده برای میان لایه های تخریب شده عبارتند از: برای حالت هوا از ۵ تا ۳۵ میلی متر، برای میان لایه ماسه ای از ۵ تا ۱۵ میلی متر و برای میان لایه شنی از ۲۰ تا ۴۵ میلی متر.

ضخامتهای در نظر گرفته شده برای میان لایه های تخریب شده عبارتند از: برای حالت هوا از ۵ تا ۳۵ میلی متر، برای میان لایه ماسه ای از ۵ تا ۱۵ میلی متر و برای میان لایه شنی از ۲۰ تا ۴۵ میلی متر.



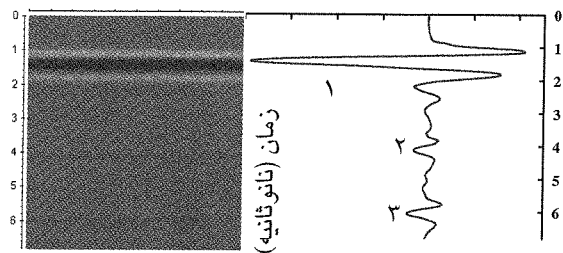
شکل (۴): مدل های مختلف مورد آزمایش: الف) اتصال مناسب بین دو لایه آسفالتی و بتنی، ب) مرز تماس تخریب شده با ایجاد درز در بین دو لایه، ج) مرز تماس تخریب شده از جنس ماسه یا شن

### ۵-۱- ذخیره و ثبت اطلاعات

سیستم کنترل دستگاه رادار وظیفه ثبت اطلاعات و امواج دریافتی توسط آنتن مرکزی را بعهده دارد. اطلاعات ذخیره شده بصورت رادارگرام بر روی نمایشگر ظاهر می گردد. رادارگرام نمایش دهنده تصویر مغناطیسی مقطع قائم لایه های مختلف روسازی راه است. در شکل (۵) قسمت الف، یک نمونه رادارگرام برداشت شده از روسازی مورد نظر توسط رادار تزویج به هوا نشان داده شده است.

در این رادارگرام، محور قائم نشان دهنده زمان رفت و برگشت امواج در درون لایه ها و بر حسب نانو ثانیه است. محور افقی نمایش دهنده شدت انرژی دریافت شده توسط آنتن گیرنده است. با توجه به ثابت بودن آنتن، مقدار انرژی در جهت طولی تصویر تغییر نمی کند. در این تصویر به سادگی می توان خطوط افقی با رنگهای سیاه و سفید را از زمینه طوسی رنگ تفکیک نمود. این خطوط نشان دهنده تغییر خواص الکترومغناطیسی محیط هاست.

در شکل (۵) قسمت ب، شکل موج مقطع روسازی با استفاده از تصویر رادارگرام نشان داده شده است. این شکل از سه سیگنال مختلف تشکیل شده است: اولین سیگنال نشان دهنده موج مستقیم فرستاده شده توسط آنتن فرستنده و دریافت شده توسط آنتن گیرنده است. دومین سیگنال، موج برگشتی از سطح فوقانی رویه روسازی را نشان می دهد، و سرانجام سومین سیگنال، نشان دهنده موج برگشتی از مرز میان دو رویه قیری و سیمانی است.



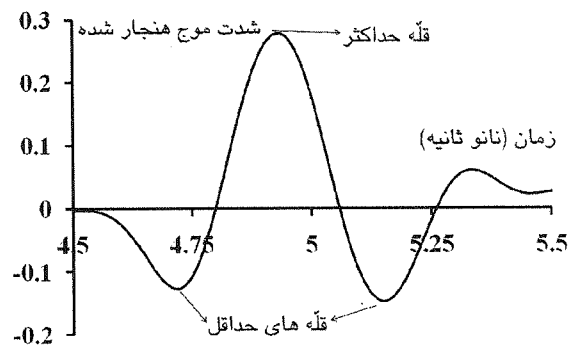
شکل (۵): الف) رادارگرام ذخیره شده توسط یک رادار تزویج به هوا، ب) شکل موج برداشتی از رادارگرام

در این مطالعات مهمترین مشخصات سیگنال بازگشتی از میان لایه ها (سیگنال ۳) برای حالت های کیفی و کمی مختلف آن مورد بررسی و ارزیابی قرار داده شده است که عبارتند از: الف) شکل سیگنال، ب) شدت پیک های حداکثر و حداقل سیگنال، ج) زمان رفت و برگشت امواج برای هر سیگنال.

مقایسه داده‌ها و اطلاعات بر اساس تجزیه و تحلیل امواج و سیگنال‌های بازگشتی از میان لایه‌ها صورت می‌گیرد. برای یک سیگنال زمانی دو مولفه اصلی قابل مطالعه عبارتند از: شدت موج و زمان رفت و برگشت آن.

برای مصالح زمین شناسی شکل موج یا سیگنال بازگشتی از مرز لایه‌ها به گونه‌ای است که برای آن می‌توان سه قله در نظر گرفت شکل (۶)، یک قله حداکثر و دو قله حداقل. علامت این قله‌ها تابع جهت پولاریزاسیون و نسبت مقادیر ثابت دی الکتریک لایه‌های فوقانی و تحتانی مرزی است که موج را منعکس کرده است. علامت قله حداکثر همواره مخالف علامت قله‌های حداقل است و قدر مطلق مقادیر قله‌های حداکثر و حداقل در هر موج نشان دهنده انرژی بازگشتی از میان لایه‌هاست. در اغلب موارد تنها مقدار قله بیشینه به عنوان شاخص انرژی بازگشتی انتخاب می‌گردد و آن معیاری است که در این مطالعات در نظر گرفته شده است.

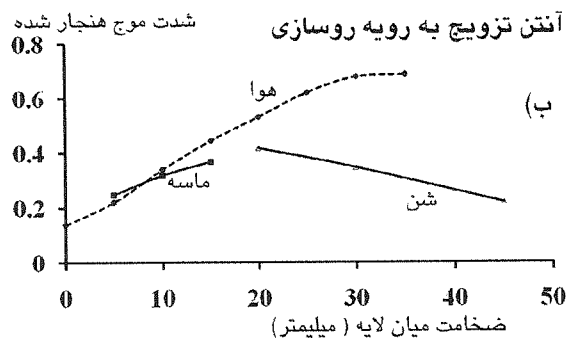
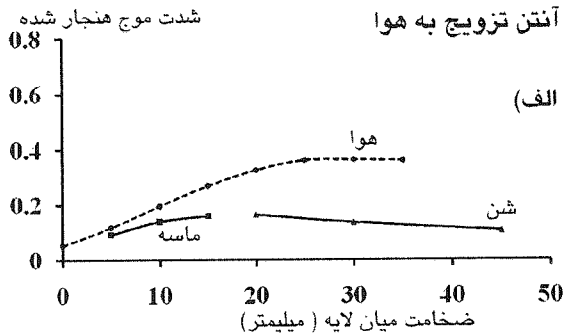
از طرف دیگر به منظور یکنواخت کردن امواج، مقادیر مختلف شدت یک موج به مقدار حداکثر انرژی قابل بازگشت تقسیم شده که به آن هنجارسازی موج گفته می‌شود. مقدار انرژی حداکثر برابر با مقدار شدت قله حداکثر موج بازگشتی از یک صفحه فلزی است. برای یک آنتن تزویج به هوا، صفحه فلزی روی سطح فوقانی راه تعبیه می‌گردد و در حالت آنتن تزویج به رویه روسازی، این صفحه در زیر لایه قبری قرار می‌گیرد. در شکل (۶)، یک نمونه سیگنال بازگشتی از یک میان لایه روسازی بعد از هنجارسازی شدت موج، نشان داده شده است. باتوجه به اطلاعات یاد شده، و برای دو موقعیت قرارگیری آنتن، امواج بازگشتی از کلیه حالت‌های مختلف میان لایه‌ها برداشت و ذخیره شده است. و سپس عمل هنجارسازی امواج انجام شده و برای هر حالت، مقادیر شدت حداکثر و زمان رفت و برگشت مربوطه تعیین شده است.



شکل (۶): نمونه موج بازگشتی از میان لایه

### ۱-۳-۵ مقایسه شدت حداکثر موج

در شکل (۷)، نمودار تغییرات مقادیر شدت موج نرمال شده بر حسب ضخامت میان لایه‌ها برای دو موقعیت مختلف آنتن، آنتن تزویج به هوا و آنتن تزویج به سطح فوقانی روسازی، نشان داده شده است.



شکل (۷): مقادیر شدت موج هنجار شده بر حسب ضخامت میان لایه: الف) آنتن تزویج به هوا، ب) آنتن تزویج به رویه

مقایسه ارقام بدست آمده در شکل (۷)، نشان می‌دهد که مقادیر شدت موج هنجار شده، برای آنتن تزویج به هوا حدود دو برابر این مقادیر برای آنتن تزویج به سطح فوقانی روسازی است. بعنوان مثال مقدار شدت موج در حالت اتصال مناسب دو لایه آسفالت قیری و آسفالت بتنی برای آنتن تزویج به هوا برابر ۰/۰۵ و برای آنتن تزویج به رویه روسازی برابر ۰/۱۵ است. این موضوع بیانگر این است که در شرایطی که اختلاف ضرایب دی الکتریک مصالح رویه کم است، استفاده از آنتن تزویج به رویه روسازی مناسب تر است.

همچنین در این اشکال مشاهده می‌گردد که تغییرات شدت موج یا بعبارت دیگر مقدار قله حداکثر بازگشتی از یک میان لایه تخریب شده با افزایش ضخامت این میان لایه ابتدا افزایش و سپس کاهش (میان لایه شنی) می‌یابد.

با مطالعه دقیق شکل امواج بازگشتی از مرز تماس دو لایه

رضخامت‌های کم بیش از شیب آن در محدوده رضخامت های زیاد خواهد بود.

### ۵-۳-۲ مقایسه زمان رفت و برگشت

زمان رفت و برگشت امواج بازگشتی از میان لایه ها پارامتر بعدی است که مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این خصوص زمان مربوط به اولین قله حداقل، بعنوان زمان تخمینی در محاسبات منظور شده است. در جدول (۴) زمان رفت و برگشت امواج بازگشتی از میان لایه ها، برای دو موقعیت اندازه گیری، آنتن تزویج به هوا و تزویج به سطح فوقانی روسازی، و برای میان لایه ها با مصالح مختلف نشان داده شده است. در این جدول تنها دو رضخامت مختلف لایه میانی مقایسه شده است. متذکر می‌گردد که زمان رفت و برگشت موج بازگشتی، از یک میان لایه سالم برابر ۶ و ۳٫۳۶ نانو ثانیه، برترتیب برای آنتن تزویج به هوا و به سطح روسازی است.

مقایسه ارقام نشان داده شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که جنس لایه میانی تخریب شده نیز تاثیر معنی داری بر زمان رفت و برگشت امواج دارد. با اینکه اختلاف جبری بین ارقام کم است، ولی اختلاف زمان رفت و برگشت برای اندازه گیری با آنتن تزویج به هوا قابل توجه است.

در حقیقت هر موج با یک محدوده و دامنه فرکانسی همراه بوده و پیرو آن، جنس مصالح میان لایه می‌تواند در انعکاس فرکانسهای خاصی تأخیر ایجاد نماید. در نتیجه زمان دریافت امواج برای مصالح مختلف متفاوت است.

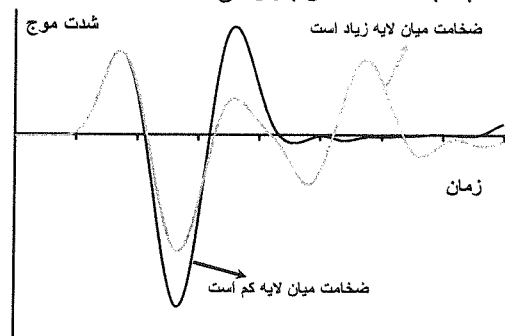
جدول (۴): زمان رفت و برگشت امواج از میان لایه ها برای دو موقعیت اندازه گیری و ۲ رضخامت مختلف.

رضخامت	لایه میانی	زمان (نانو ثانیه)	
		آنتن تزویج به هوا	آنتن تزویج به رویه روسازی
۵ میلیمتر	هوا	۵٫۹۵	۳٫۳۷
	شن	۵٫۸۱	۳٫۲۵
	ماسه	۵٫۷۹	۳٫۲۵
۱۰ میلیمتر	هوا	۵٫۹۶	۳٫۲۸
	شن	۵٫۸۲	۳٫۲۶
	ماسه	۵٫۸۰	۳٫۲۶

روسازی، شکل (۸)، مشاهده می‌گردد که این تغییر در مقدار شدت موج تحت تأثیر رضخامت لایه تخریب شده است. برای رضخامت‌های کم، آنتن گیرنده تنها یک سیگنال را دریافت می‌نماید. این سیگنال مجموع دو سیگنال متوالی بازگشتی از مرز لایه اول (لایه آسفالت قیری) و لایه تخریب شده و مرز لایه تخریب شده و لایه دوم (لایه سیمانی) است.

با افزایش رضخامت لایه تخریب شده، دو سیگنال یاد شده از هم جدا شده و مقدار شدت موج حداکثر مربوط به اولین سیگنال بازگشتی کاهش می‌یابد. در صورتی که رضخامت لایه میانی همچنان افزایش یابد، در نهایت مقدار شدت موج اولین سیگنال بازگشتی به عدد ثابتی میل می‌کند. فرکانس مرکزی آنتن و یا بعبارت دیگر طول موج سیگنال های عبوری از درون لایه‌های روسازی، فاکتور موثری در تفکیک دو سیگنال بازگشتی از مرز لایه ها است. در صورتیکه فرکانس آنتن بالا باشد، طول موج سیگنالها کاهش یافته و در نتیجه آن دقت تفکیک افزایش می‌یابد.

جنس مصالح روسازی دومین فاکتور موثر در تفکیک این سیگنالهاست. همچنانکه در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، مقدار حداکثر شدت موج دریافتی برای شن و ماسه، نسبت به هوا، در رضخامت کمتری اتفاق افتاده است. برای هوا مقدار شدت حداکثر برای رضخامت ۳۳ میلیمتری رخ می‌دهد، در صورتیکه برای لایه شنی این رقم برابر ۲۰ میلیمتر و برای لایه ماسه ای برابر ۱۸ میلیمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ضریب دی الکتریک مصالح، نقش بسیار موثری را در نحوه تغییرات شدت موج نسبت به رضخامت آن بازی می‌کند.



شکل (۸): سیگنال بازگشتی از میان لایه های در حالت های رضخامت کم رضخامت زیاد

با مقایسه منحنی های شکل (۷) می‌توان دریافت که شیب منحنی تغییرات شدت موج نسبت به رضخامت نیز تابعی از جنس مصالح روسازی است. لذا چنانچه اختلاف ضرایب دی الکتریک مصالح لایه تخریب شده نسبت به لایه های فوقانی و تحتانی آن قابل توجه باشد، مقدار شیب تغییرات شدت موج در محدوده

- Grégoire C.; "Fracture Characterization by Ground Penetrating Radar", PH.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2001.
- Freeland R.S.; Yoder R.E., Ammons J.T., "Mapping Shallow Underground Features that influence Site-specific Agricultural Production" Journal of Applied geophysics, Vol. 4, PP. 19-27, 1998.
- Olhoeft, G. R. and Jones, D. P.; "Noninvasive Complex Resistivity Measurements of Clay-Organic Processes to Map Organic Contamination and Degradation of Clay Barriers": in Selected research in environmental quality, Panama City, FL, AFOSR, Bolling AFB DC, p. 211-216, 1997.
- Michael H. Powers and Gary R. Olhoeft; "Modeling The GPR Response Of Leaking, Buried Pipes" in Proc. Of SAGEEP'96, 28 April - 2 May, Keystone, CO, R. S. Bell and M. H. Cramer, compilers, Wheat Ridge, CO, EEGS, p. 525-534, 1996.
- Olhoeft, G. R., Powers, M. H. and Capron, D. E., 1994; "Buried object detection with ground penetrating radar" in Proc. of Unexploded Ordnance (UXO) detection and range remediation conference, Golden, CO, May 17-19, p. 207-233, 1994.
- Derobert, X. "Technique radar a haute frequence appliqué aux couches minces de chaussee" Journees Techniques Scientifiques, LCPC, NANTES, 2003.
- M.O. Gordon\*, K. Broughton, M.S.A. Hardy; "The assessment of the value of GPR imaging of flexible pavements" NDT&E International, Vol. 31, No. 6, pp. 429-438, Elsevier Science Ltd, 1998.
- Attoh-Okine N.O.; "Using Ground Penetrating Radar in Pavement Thickness Measurement: a Cost Comparison With the Traditional Coring method". Proceedings of the Institution of Civil Engineering- Municipal Engineer, paper 11137, pp. 86-89, August 1996.
- Al-Qadi I.L., Loulizi A., Lahouar; "Dielectric Characterization of Hot-mix asphalt at the smart road using GPR" Ninth International Conference on GPR, April-May, Santa Barbara California- USA 2002.
- Fauchard C.; "Utilisation de Radar tres hautes Frequences. Application a l'Auscultation non Destructive des Chaussees", These de Doctorat, Universite de Nantes, 2001.
- Fernando, E. G.; "development of a Radar Analysis Program for Layer Thickness Determinations", Research Report RF7257-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, 100 pp, 2001.

## ۹- زیر نویس ها

- <sup>1</sup> GPR - Ground Penetrating Radar
- <sup>2</sup> Resolution
- <sup>3</sup> Geophysical Survey Systems Inc.
- <sup>4</sup> Radar gram
- <sup>5</sup> Normalization

## ۷- تقدیر و تشکر

گردآورنده شیوه نامه حاضر، وظیفه خود می‌داند که از اساتید محترم، آقایان دکتر Xavier DEROBERT از آزمایشگاه مرکزی وزارت راه و ترابری شهر نانت - فرانسه، دکتر Mustapha HELLOU و دکتر Juan MARTINEZ از انستیتو ملی علوم کاربردی رن - فرانسه به خاطر اندیشه های ارزشمندشان قدردانی نماید. همچنین از آزمایشگاه مرکزی وزارت راه و ترابری نانت و انستیتو ملی علوم کاربردی رن که تجهیزات و مصالح انجام پژوهش حاضر را در اختیار اینجانب قرار داده اند تشکر می‌گردد. درخاتمه، از اساتید محترم که نشریه را در ارتقای کیفی آن یاری می‌دهند، سپاسگزاری می‌نماید.