

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

گروه : ژئوفیزیک

عنوان پایان نامه :

تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت و خاک زیر سطحی آن و بررسی نمونه های آسفالت و اساس به کمک روش

GPR

دانشجو : احمد مزینانی

استاد راهنما :

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

مهندس مهدی محمدی ویژه

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ماه ۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

گروه : ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) آقای/ خانم . ..احمد مزینانی.....

تحت عنوان:

تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت و خاک زیر سطحی آن و بررسی های نمونه های آسفالت و اساس به کمک روش GPR

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد (رساله دکتری) مورد ارزیابی و با

درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
		نام و نام خانوادگی :	
		نام و نام خانوادگی :	
		نام و نام خانوادگی :	

تقدیم به

مادر

و

روح پدر

تشکر و قدر دانی

پس از حمد و سپاس الهی بر خود واجب می‌دانم که از تمامی اساتیدی که در تدوین این پایان‌نامه مرا یاری کردند تشکر و قدردانی کنم. از جناب دکتر کامکار روحانی که در طول این مدت، از راهنمایی‌های مفیدشان استفاده کردم، تشکر و قدردانی می‌کنم. از جناب مهندس محمدی‌ویژه بعنوان استاد مشاور که حقیقتاً در پیشبرد این پایان‌نامه نقش بسزایی داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. از ریاست محترم دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، جناب دکتر دولتی و آقای شاه حسینی که زحمات این پایان‌نامه گریبان‌گیر ایشان نیز شده بود و در این مدت دلسوزانه مرا یاری کردند، قدردانی می‌کنم. از آقایان دکتر کارآموزیان، مهندس کبیریان و مهندس زارعی که در انجام بخش عملی این پروژه مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین بر خود واجب می‌دانم که از آقای دکتر عرب امیری و آقای دکتر جلالی که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند، تشکر کنم. در پایان از تمامی کسانی که مستقیم و غیرمستقیم در انجام این پروژه مرا یاری کردند و در اینجا نامی از آنها آورده نشد، صمیمانه قدردانی می‌کنم، امیدوارم در سایه رحمت الهی همیشه سلامت و پیروز باشند.

احمد مزینانی

E-mail: a_m52203@yahoo.com

اینجانب احمد مزینانی تأیید می نمایم که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات اینجانب می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده ام.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

تیر ماه ۱۳۸۹

چکیده

روش GPR یا رادار نفوذی به زمین یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که برای بررسی‌های زیر سطحی طبیعی و برخی ساختارهای مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش یک آنتن فرستنده، امواج الکترومغناطیس را به شکل یک پالس به داخل زمین یا ساختارهای مصنوعی می‌فرستد. وجود ناهمگنی‌های الکتریکی در این محیط‌ها باعث انعکاس این امواج می‌شود؛ سپس امواج انعکاس یافته توسط آنتن گیرنده دریافت و ثبت می‌شوند.

یکی از کاربردهای مؤثر این روش در زمینه کنترل کیفی روسازی است. چراکه روسازی بعنوان یک ساختار مصنوعی، از لایه‌های مجزا و مشخصی تشکیل شده که بخوبی توسط GPR قابل آشکارسازی هستند. هدف اولیه در استفاده از این روش بر روی روسازی‌ها، تعیین ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده روسازی است. به‌علاوه به کمک این روش می‌توان برخی خصوصیات مهم کیفی مورد توجه مهندسين را به‌دست آورد.

در بخشی از این مطالعه از روش GPR برای تعیین ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده روسازی یعنی لایه آسفالت و خاک زیر سطحی آن در محوطه‌ی داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. اما بنا به دلایلی که مهم‌ترین آن پایین بودن فرکانس مرکزی دستگاه مورد استفاده است، تعیین ضخامت لایه‌های روسازی به‌خصوص لایه آسفالتی چندان موفقیت‌آمیز نبود.

در بخش دیگری از این مطالعه از روش GPR برای تعیین خصوصیات کیفی لایه‌های آسفالت و اساس استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌های مختلف آسفالت و اساس تهیه شدند تا برخی از خصوصیات کیفی مانند میزان حفرات و درصد رطوبت در آن‌ها به کمک داده‌های GPR مورد بررسی قرار گیرند. برای این منظور، ثابت دی‌الکتریک این نمونه‌ها با استفاده از روش بازتاب سطحی تعیین شده و سپس بین این کمیت و درصد حفرات نمونه‌های آسفالتی و درصد رطوبت اساس رابطه برقرار شد. به‌دلیل کوچک بودن ابعاد نمونه‌ها، مقادیر ثابت دی‌الکتریک به‌دست آمده از روش بازتابش سطحی، بزرگتر از

مقدار ثابت دی‌الکتریک واقعی نمونه‌هاست. اما با این حال، رابطه بین این کمیت و خصوصیات کیفی مذکور، منطقی است.

کلید واژه: رادار نفوذی به زمین، روسازی راه، آسفالت، اساس، درصد حفرات، درصد رطوبت

مقالات مستخرج از پایان نامه:

تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت در محوطه داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود. چهاردهمین

کنفرانس ژئوفیزیک. ایران، تهران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۴
۳-۱- هدف از مطالعه ی حاضر.....	۵
۴-۱- ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم : اصول روش <i>GPR</i> و چگونگی استفاده از آن در کنترل کیفی روسازی.....	۶
۱-۲- انتشار موج در مواد مورد استفاده در روسازی.....	۷
۱-۱-۲- گذردهی دی الکتریک.....	۷
۲-۱-۲- رسانندگی الکتریکی.....	۱۰
۳-۱-۲- تراوایی مغناطیسی.....	۱۲
۴-۱-۲- انتشار موج.....	۱۳
۳-۲- خصوصیات امواج الکترومغناطیس.....	۱۴
۱-۲-۲- سرعت.....	۱۴
۲-۲-۲- میرایی (تضعیف).....	۱۶
۱-۲-۲-۲- میرایی ناشی از رسانایی.....	۱۶
۲-۲-۲-۲- میرایی ناشی از پراکندگی.....	۱۷
۳-۲-۲-۲- میرایی ناشی از گسترش هندسی.....	۱۸
۳-۲-۲- امپدانس الکترومغناطیسی.....	۱۸
۴-۲-۲- پاشیدگی.....	۱۹
۳-۲- عمق نفوذ.....	۱۹

- ۲۰-۴-۲- قانون اسنل.....
- ۲۱-۵-۲- ضرائب انعكاس و انتقال فرسئل.....
- ۲۱-۶-۲- شكل پالس **GPR**.....
- ۲۲-۷-۲- پهنای پالس و قدرت تفکیک عمودی و جانبی.....
- ۲۴-۸-۲- ردپای **GPR**.....
- ۲۵-۹-۲- انواع سیستم های **GPR**.....
- ۲۵-۱-۹-۲- آنتن های جفت شده به هوا.....
- ۲۶-۲-۹-۲- آنتن های جفت شده به زمین.....
- ۲۶-۱۰-۲- انواع روش های برداشت داده ها در **GPR**.....
- ۲۶-۱-۱۰-۲- روش دورافت مشترک.....
- ۲۷-۲-۱۰-۲- روش نقطه میانی مشترک و بازتاب و شکست زاویه باز.....
- ۲۸-۳-۱۰-۲- روش (توموگرافی) **Transillumination**.....
- ۲۹-۱۱-۲- پردازش داده های **GPR**.....
- ۲۹-۱-۱۱-۲- تصحیح اشباع سیگنال.....
- ۳۰-۲-۱۱-۲- پردازش بهره.....
- ۳۰-الف- بهره **AGC**.....
- ۳۰-ب- بهره **SEC**.....
- ۳۱-۲-۱۱-۳- پردازش واهمامیخت (واپیچش).....
- ۳۱-۱۲-۲- ضخامت و خصوصیات کیفی لایه های رو سازی.....
- ۳۱-۱۳-۲- انواع روسازی.....
- ۳۲-۱۴-۲- روش های تعیین گذردهی دی الکتریک لایه های روسازی.....
- ۳۳-۱-۱۴-۲- روش انعكاس سطحی.....

۳۴	..... روش <i>CMP</i> ۲-۱۴-۲
۳۵	..... تعیین ضخامت لایه های روسازی به کمک روش <i>GPR</i> ۲-۱۵
۳۶	..... تعیین میزان حفرات آسفالت ۲-۱۶
۳۷	..... مدل شاخص انکساری ترکیبی ۲-۱۶-۱
۳۸	..... مدل ترکیبی ریلی ۲-۱۶-۲
۳۸	..... فرمول ترکیبی بوچر ۲-۱۶-۳
۴۰	..... مقادیر دی الکتریک راه های آسفالتی قدیمی ۲-۱۷
۴۰	..... تعیین محتوای رطوبت اساس ۲-۱۸
۴۲	..... مدل تاپ ۲-۱۸-۱
۴۲	..... مدل شاخص انکساری ترکیبی ۲-۱۸-۲

فصل سوم: تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت و خاک زیرسطحی آن در محوطه‌ی داخل

۴۴	..... دانشگاه صنعتی شاهرود
۴۵	..... مقدمه ۳-۱
۴۵	..... برداشت داده ها ۳-۲
۴۹	..... پردازش اولیه داده ها ۳-۳
۴۹	..... تعیین ضخامت لایه های آسفالت و اساس ۳-۴
۵۰	..... تست لیفتینگ ۳-۴-۱
۵۱	..... تعیین سرعت موج در زمین ۳-۴-۲
۵۳	..... بررسی انطباق ضخامت آسفالت و اساس با مقاطع عمقی <i>GPR</i> ۳-۴-۳
۵۴	..... الف - مقطع عمقی شماره ۴
۵۶	..... ب- مقطع عمقی شماره ۶

ج- مقطع عمقی شماره ۳۰.....	۵۹
د- مقطع عمقی شماره ۳.....	۶۳
ر- مقطع عمقی شماره ۱۱.....	۶۵
ز- مقطع عمقی شماره ۱۷.....	۶۷
ه- مقطع عمقی شماره ۲۴.....	۶۹
۳-۵- تعیین خصوصیات کیفی آسفالت.....	۷۳
۳-۶- تعیین خصوصیات کیفی خاک زیر سطحی.....	۷۴
فصل چهارم: تعیین درصد حفرات هوای نمونه های آسفالتی به کمک روش <i>GPR</i>	۷۸
۴-۱- مقدمه.....	۷۹
۴-۲- تهیه ی نمونه های آسفالتی.....	۷۹
۴-۳- نتایج بدست آمده از روش <i>GPR</i>	۸۰
۴-۴- تعیین درصد حفرات هوای نمونه های آسفالتی.....	۹۳
۴-۵- رابطه ی بین درصد حفرات هوا و ثابت دی الکتریک نمونه ها.....	۹۵
فصل پنجم: تعیین محتوای رطوبت اساس به کمک روش <i>GPR</i>	۹۸
۵-۱- مقدمه.....	۹۹
۵-۲- تهیه ی نمونه ی اساس و برداشت داده ها.....	۹۹
۵-۳- تعیین درصد رطوبت نمونه ها.....	۱۰۹
۵-۴- رابطه ی بین ثابت دی الکتریک و درصد رطوبت نمونه ها.....	۱۱۱
فصل ششم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۱۳

پیوست..... ۱۱۸

فهرست منابع..... ۱۳۲

چکیده انگلیسی..... ۱۳۵

فصل (۱)

کلیات

GPR^۱ یا رادار نفوذی به زمین یکی از معمول‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که در آن از تابش‌های الکترومغناطیسی برای بررسی‌های زیر سطحی طبیعی و نیز بررسی برخی از ساختارهای مصنوعی نظیر پل‌ها و جاده‌ها استفاده می‌شود. در این روش امواج رادار به داخل زمین و یا ساختارهای مورد بررسی فرستاده می‌شوند؛ سپس امواج بازتاب شده از ناپیوستگی‌ها، دریافت و ثبت می‌شوند و از روی آنها محل ساختارهای مدفون و یا مرزهای زیرسطحی تعیین می‌شود.

در حال حاضر از روش **GPR** در زمینه‌های متنوعی استفاده می‌شود. اما به‌طور کلی می‌توان کاربردهای این روش را به سه دسته‌ی زیر تقسیم بندی کرد:

۱- بررسی‌های زمین شناسی:

از روش **GPR** می‌توان برای بررسی ساختارها و لایه‌بندی رسوبات، آشکارسازی گسل‌ها، بررسی عمق سطح ایستابی، مطالعات زیست محیطی و غیره استفاده کرد.

۲- باستان شناسی:

از آنجایی که بررسی‌های غیرتخریبی در مطالعات باستان‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردارند، روش **GPR** یک روش کارآمد در تعیین محل ساختارهای باستانی مدفون به شمار می‌آید.

۳- کاربرد در مهندسی عمران:

از روش **GPR** می‌توان به عنوان یک روش مناسب در کنترل کیفی جاده‌ها و بزرگراه‌ها، راه‌آهن، پل‌ها، بررسی سازه‌های بتنی، بررسی شرایط محل سدسازی و یا تعیین محل لوله‌ها، کانال‌ها و حفرات زیرسطحی استفاده کرد.

استفاده از امواج الکترومغناطیسی برای تشخیص ساختارهای زیرسطحی جدید نیست. بدون شک اولین کار موفق در این زمینه، استفاده از بازتاب‌های امواج **GPR** برای تعیین ضخامت صفحات یخی در

¹ Ground Penetrating Radar

یخچال‌ها است که توسط انان و دیویس^۲ در سال ۱۹۷۴ انجام گرفته است [۱]. بعد از آن مطالعات و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در مورد استفاده از روش **GPR** در زمینه‌های مختلف انجام گرفته است. استفاده از روش **GPR** برای کنترل کیفی روسازی^۳ به تازگی متداول شده است. اولین مورد استفاده از روش **GPR** برای بررسی‌های غیرتخریبی جاده‌های آسفالتی توسط یک گروه تحقیقاتی در فنلاند و به سرپرستی سارنکتو^۴ در سال ۱۹۹۲ گزارش شد. او و همکارانش از این روش برای تعیین ضخامت لایه‌های روسازی و نیز تعیین میزان حفرات آسفالت استفاده کردند. میسر و اسکالین^۵ در سال ۱۹۹۲ یک سیستمی برای تحلیل داده‌ها توسعه دادند که می‌توانست ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده‌ی روسازی را نشان دهد. القادی^۶ در سال ۱۹۹۴ با آنتن‌های **GPR** فرکانس بالا، بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی دی‌الکتریک آسفالت را تعیین کرد. شفری^۷ در سال ۱۹۹۶ با استفاده از روش **GPR** رابطه‌ی بین چگالی نمونه‌های آسفالتی و میزان تضعیف پالس **GPR** را تعیین کرد. رملی و اسکالین^۸ در سال ۱۹۹۷ از تکنیک **GPR** برای تعیین محل نقاطی از آسفالت که در آن‌ها پیوند بین دانه‌های آسفالت به دلیل نفوذ رطوبت و هوا گسیخته شده است، استفاده کردند. علاوه بر این، تحقیقات زیادی برای ایجاد ارتباط بین خصوصیات فیزیکی خاک و داده‌های **GPR** توسط افراد مختلف انجام شده است؛ که از بین آن‌ها می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط پیلینسکی و دابسون^۹ در سال ۱۹۸۵ اشاره کرد؛ که طی آن بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی دی‌الکتریک برای خاک‌هایی با دانه‌بندی‌ها و درصد رطوبت‌های مختلف مدل‌سازی شد. الهرزی و لنج^{۱۰} در سال ۱۹۸۷ رابطه‌ی بین ثابت دی‌الکتریک خاک و محتوای رطوبت و تخلخل آن را مدل‌سازی کردند. همچنین مدل‌های مختلفی برای ایجاد ارتباط بین محتوای رطوبت خاک و ثابت دی‌الکتریک آن از

² Annan, Davis

³ Pavement

⁴ Saarenketo

⁵ Maser, Scullion

⁶ Al-Qadi

⁷ shafri

⁸ Remeili. Scullion

⁹ Peplinski, Dobson

¹⁰ Al- Harthi, Lange

طرف اشخاص مختلف ارائه شده است؛ که از بین آن‌ها می‌توان به مدل تاپ و همکاران^{۱۱} در سال ۱۹۸۰، مدل هرکلاز^{۱۲} در سال ۱۹۹۱ و مدل میلر و گاسکین^{۱۳} در سال ۱۹۹۹ اشاره نمود.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

طراحی و اجرای روسازی‌ها باید مطابق با اصول مهندسی و استانداردهای خاص آن انجام گیرد. عدم رعایت این اصول و استانداردها منجر به ناپایداری و تخریب روسازی‌ها شده و هزینه‌های هنگفتی را جهت تعمیر و بازسازی آنها به نهادهای مربوطه وارد می‌کند. طبق آمار، نهادهای دولتی سالیانه بیش از ۹۰ میلیون دلار برای بازسازی و تعمیر روسازی‌ها صرف می‌کنند. اگر فرآیند کنترل کیفی با معرفی روش‌های قابل اعتماد افزایش پیدا کند، کاهش در هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها قابل ملاحظه خواهد بود [۲].

تخمین واقعی ضخامت لایه‌های روسازی و تعیین محل نقاط ضعف، پارامترهای مهمی در امر کنترل کیفی هستند؛ که همواره مورد توجه مهندسين روسازی قرار می‌گیرند. در گذشته برای تخمین ضخامت لایه‌ها و تعیین محل نقاط ضعف، از نقاط مختلف روسازی مغزه‌گیری می‌شد. این روش وقت‌گیر و پرهزینه است و منجر به تخریب ساختار روسازی و تضعیف آن در محل مغزه‌گیری می‌شود. به علاوه اطلاعات بدست آمده از این روش بصورت نقطه‌ای و گسسته‌اند و لزوماً محل نقاط ضعف را نشان نمی‌دهند. حتی در روش‌های جدید نیز، مانند روش‌های هسته‌ای محدودیت‌هایی مانند نقطه - ای بودن داده‌ها وجود دارد. در مقابل، روش *GPR* به‌عنوان یک روش غیر تخریبی و سریع می‌تواند از تمام طول روسازی یک مقطع کامل ارائه دهد [۲].

¹¹ Topp, etal

¹² Herkelath

¹³ Miller, Gaskin

۱-۳- هدف از مطالعه‌ی حاضر

خوشبختانه تکنولوژی *GPR* برای کنترل کیفی روسازی به ایران نیز راه یافته است، ولی هنوز به حد مطلوب خود نرسیده و در بسیاری از موارد از روش‌های قدیمی جهت کنترل کیفی روسازی‌ها استفاده می‌شود. لذا هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی برخی از قابلیت‌های این روش جدید در امر کنترل کیفی روسازی است. در این مطالعه سعی بر این است که با استفاده از روش *GPR*، برخی خصوصیات مهندسی بخش‌های مختلف روسازی که از لحاظ کنترل کیفی اهمیت دارند، مورد بررسی قرار گیرند. خصوصیتی که در این پایان‌نامه به کمک روش *GPR* مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل بررسی ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده روسازی، بررسی برخی از خصوصیات کیفی لایه‌های روسازی مانند درصد حفرات هوای موجود در آسفالت و درصد رطوبت اساس^{۱۴} آسفالت به کمک این روش است.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر از شش فصل تشکیل شده است. فصل اول این پایان‌نامه به معرفی کلی روش *GPR*، تاریخچه آن، معرفی برخی از کاربردهای آن و اهداف و ضرورت انجام مطالعه در زمینه کنترل کیفی روسازی می‌پردازد. در فصل دوم به اصول تئوری روش *GPR* و نحوه استفاده از آن در کنترل کیفی روسازی پرداخته می‌شود. فصل سوم این پایان‌نامه در مورد مراحل برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های *GPR* در محوطه داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود است. بررسی درصد حفرات داخل آسفالت به کمک روش *GPR*، موضوعی است که در فصل چهارم این پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی محتوای رطوبت خاک اساس نیز در فصل پنجم بحث خواهد شد. در پایان، در فصل ششم به طور خلاصه نتایج حاصل از تمام فعالیت‌های انجام شده در تحقیق حاضر مورد بحث قرار خواهند گرفت. امید است که با انجام این تحقیق، گامی هر چند کوچک در پیشبرد علم و تکنولوژی در کشور برداشته شود.

¹⁴ Base

فصل (۲)

اصول روش *GPR*

در کنترل کیفی روسازی

۲-۱- انتشار موج در مواد مورد استفاده در روسازی

روش **GPR** یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که در آن از پالس‌های الکترومغناطیسی با پهنای مشخص برای بررسی‌های زیرسطحی استفاده می‌شود. در این روش یک آنتن فرستنده، یک پالس الکترومغناطیس را به داخل زمین می‌فرستد و هنگامی که این پالس به ناهمگنی‌های الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از انرژی آن به صورت پالس بازتابی (انعکاسی) به طرف سطح زمین برگشته و توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود. پالس‌های دریافت شده به ترتیب زمان وقوع‌شان در طول محور زمان ثبت می‌شوند و دامنه آنها نیز برحسب میلی‌ولت و یا دسی‌بل نمایش داده می‌شود.

برای درک بهتر چگونگی استفاده از **GPR** و پالس‌های الکترومغناطیسی برای تعیین خصوصیات کیفی مواد مورد استفاده در روسازی آشنایی با مبانی فیزیک این روش ضروری است.

خصوصیات بنیادینی که انتشار موج یا پالس الکترومغناطیس را داخل موادی مانند مواد مورد استفاده در روسازی کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک^{۱۵} (ϵ)، رسانندگی الکتریکی^{۱۶} (σ) و گذردهی مغناطیسی^{۱۷} (μ) هستند [۱]. از آنجایی که سه ویژگی مذکور در بررسی‌های کیفی مواد مورد استفاده در روسازی با استفاده از روش **GPR** مورد استفاده قرار می‌گیرند، در ادامه توضیحاتی در مورد آنها ارائه می‌شود.

۲-۱-۱- گذردهی دی‌الکتریک (ϵ)

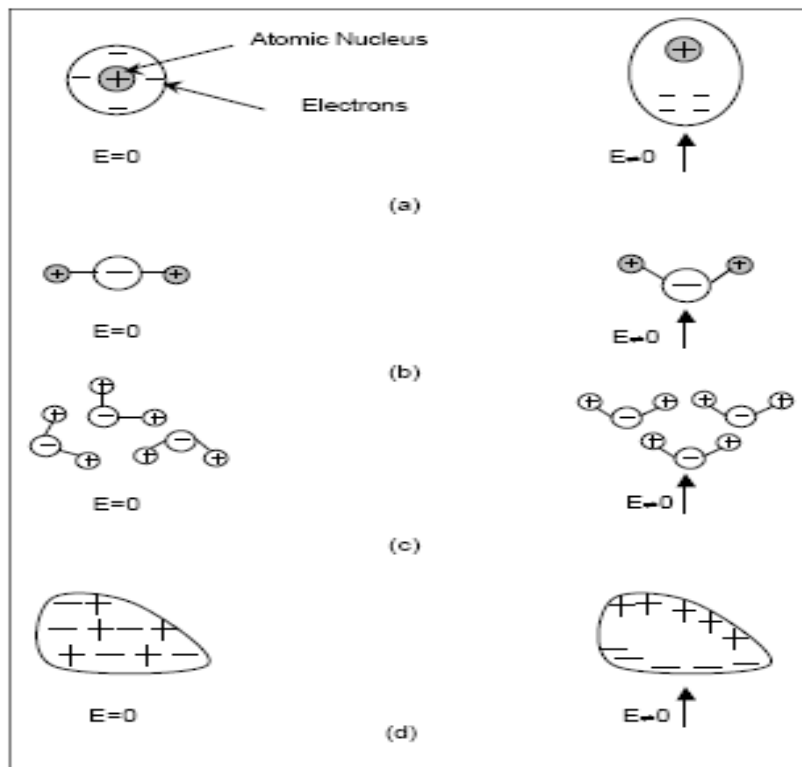
گذردهی دی‌الکتریک، مهمترین عاملی است که انتشار موج الکترومغناطیس را درون ساختارهای مورد بررسی کنترل می‌کند [۱]. هنگامی که یک میدان الکتریکی ایستا در داخل یک ماده اعمال می‌شود، بارهای الکتریکی مقید موجود در آن به صورت محدود و جزئی جابه‌جا شده و در جهت میدان جهت یافته می‌شوند. این بارها قادر به حرکت آزادانه نیستند و به همین دلیل آن‌ها را مقید می‌نامند. جابه-

¹⁵ Dielectric permittivity

¹⁶ Electrical conductivity

¹⁷ Magnetic permeability

جایی این بارهای مقید مثبت و منفی ماده، تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی باعث ایجاد دوقطبی- های الکتریکی می شود. جهت یافتگی این دوقطبی ها به گونه ای است که میدان الکتریکی خارجی اعمال شده را خنثی می کند [۲]. شکل ۱-۲ مکانیزم های مختلف ایجاد دوقطبی های الکتریکی را نمایش می دهد.



شکل ۱-۲: مکانیزم های مختلف ایجاد دوقطبی های الکتریکی [۳].

تعداد گشتاورهای دوقطبی القا شده در واحد حجم ماده (D) متناسب با میدان الکتریکی خارجی (E) است و ثابت تناسب همان گذردهی دی الکتریک (ϵ) است که در سیستم واحدهای SI برحسب فاراد بر متر ($\frac{F}{m}$) اندازه گیری می شود [۱].

$$D = \epsilon E \quad (1-2)$$

اگر میدان الکتریکی اعمال شده متناوب باشد در این صورت گذردهی دی‌الکتریک یک کمیت وابسته به فرکانس میدان (ω) خواهد بود و از دو بخش حقیقی و موهومی تشکیل می‌شود [۱].

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + \varepsilon''(\omega) \quad (2-2)$$

که در این رابطه ε' بخش حقیقی گذردهی دی‌الکتریک و ε'' بخش موهومی آن است. بخش حقیقی گذردهی دی‌الکتریک نشان‌دهنده انرژی ذخیره شده در اثر جابجایی دوقطبی‌هاست و بخش موهومی آن نشان‌دهنده میزان اتلاف انرژی است [۴].

در کاربردهای **GPR** و برای مواد معمول مورد بررسی، در اکثر موارد بخش موهومی گذردهی دی‌الکتریک در مقایسه با بخش حقیقی ناچیز بوده و در نظر گرفته نمی‌شود [۳]. حرکت و جابه‌جایی بارهای الکتریکی مقید تحت تأثیر میدان الکتریکی متناوب باعث ایجاد نوعی جریان الکتریکی، به نام جریان جابه‌جایی^{۱۸} (J_D) می‌شود که به صورت زیر نشان داده می‌شود [۱]:

$$J_D = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3-2)$$

همچنین در اغلب موارد، کار با گذردهی دی‌الکتریک نسبی یا ثابت دی‌الکتریک آسان‌تر است که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (4-2)$$

¹⁸ Displacement current

که در این رابطه ϵ_r که گاهی با k نیز نمایش داده می‌شود، گذردهی دی‌الکتریک نسبی و ϵ بخش حقیقی گذردهی دی‌الکتریک ماده است. ϵ_0 گذردهی دی‌الکتریک خلأ بوده و برابر است با $10^{-12} \times 1/185$ فاراد بر متر. جدول ۱-۲ گذردهی دی‌الکتریک نسبی یا ثابت دی‌الکتریک پاره‌ای از مواد را که در **GPR** با آن‌ها سروکار داریم، نمایش می‌دهد.

جدول ۱-۲: مقادیر ثابت دی‌الکتریک برخی از مواد [۳].

ماده	ثابت دی‌الکتریک (ϵ_r)
هوا	۱
آب	۸۱
یخ	۴
سنگ بستر (گرانیت)	۵-۷
رس	۵-۴۰
سیلت	۵-۳۰
ماسه سیلتی	۶-۱۷
ماسه خشک	۳-۵
ماسه اشباع	۲۰-۳۰
گراول	۴-۷
آسفالت	۲-۶
بتن	۸-۱۰

۲-۱-۲- رسانندگی الکتریکی (σ)

رسانندگی الکتریکی بدین لحاظ در بررسی‌های **GPR** اهمیت دارد که نقش مهمی را در تضعیف پالس‌های الکترومغناطیسی ایفا می‌کند. این ویژگی در حقیقت نشان‌دهنده توانایی حرکت بارهای الکتریکی آزاد یک ماده در حضور یک میدان الکتریکی است. بارهای الکتریکی آزاد برخلاف بارهای الکتریکی مقید قادرند آزادانه و بدون هیچ محدودیتی در ماده حرکت کنند. این بارها تحت تأثیر

میدان الکتریکی شتاب گرفته و به یک سرعت نهایی می‌رسند و جریان‌های رسانشی^{۱۹} را ایجاد می‌کنند [۴].

رابطه بین چگالی جریان رسانشی (J_c) و میدان الکتریکی به صورت زیر است [۱].

$$J_c = \sigma E \quad (5-2)$$

در مواد موجود در زمین رسانندگی در اثر پدیده‌های مختلف به وجود می‌آید. بیشتر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها و خاک‌ها مانند کوارتز و میکا فاقد بارهای الکتریکی آزاد بوده و رسانا نیستند. اما هنگامی که این کانی‌ها در تماس با آب قرار گیرند، الکترولیت‌هایی را تشکیل می‌دهند و در اثر اعمال میدان الکتریکی، حرکت یون‌ها باعث رسانندگی این مواد می‌شود. فرایندهای الکتروشیمیایی مرتبط با تبادل کاتیونی در رس‌ها نیز نقش مهمی در رسانندگی مواد زمینی دارد [۴].

مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رسانایی مواد زمینی محتوای آب و غلظت یونی است. اما عوامل دیگر مانند دما، فشار، دامنه و فرکانس میدان الکتریکی نیز بر روی آن تأثیر دارند. [۴].

نسبت بین جریان رسانشی به جریان جابجایی تحت عنوان فاکتور اتلاف (δ)^{۲۰} نامیده می‌شود و

باتوجه به روابط (۳-۲) و (۵-۲) بصورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود [۱].

$$\delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (6-2)$$

که در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای میدان الکتریکی است. این کمیت در بحث‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹⁹ Conduction current

²⁰ Loss factor

۲-۱-۳- تراوایی مغناطیسی (μ)

تراوایی مغناطیسی به ندرت در کاربردهای *GPR* اهمیت پیدا می‌کند، اما چون در برخی موارد استثنایی و برای تکمیل اطلاعات، تراوایی مغناطیسی مهم است، در اینجا توضیحی در مورد آن ارائه می‌شود.

تراوایی مغناطیسی کمیتی مشابه با گذردهی دی‌الکتریک است. با این تفاوت که در اینجا به جای دوقطبی‌های الکتریکی، دوقطبی‌های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی جهت یافته می‌شوند. خصوصیات مغناطیسی مواد به وسیله چگالی گشتاور دوقطبی مغناطیسی کنترل می‌شود که برابر با تعداد دوقطبی‌های مغناطیسی جهت یافته در واحد حجم ماده است [۱].

در سیستم واحدهای *SI* تراوایی مغناطیسی بر حسب هنری بر متر ($\frac{H}{m}$) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu = \mu_0 (1 + K) \quad (7-2)$$

که در رابطه‌ی بالا K خودپذیری مغناطیسی^{۲۱} است و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ بوده و برابر با

$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ است. تراوایی مغناطیسی نسبی به صورت زیر بیان می‌شود [۱]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} (1 + K) \quad (8-2)$$

تراوایی مغناطیسی مانند گذردهی دی‌الکتریک یک کمیت وابسته به فرکانس بوده و از دو بخش حقیقی و موهومی تشکیل شده است. تجربیات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در فرکانس‌های مورد استفاده در *GPR*، اتلاف انرژی مغناطیسی در ارتباط با ماسه‌های غنی از آهن طبیعی (کانی‌های اکسید آهن) صورت می‌گیرد [۴].

²¹ Magnetic susceptibility

۲-۱-۴- انتشار موج

معادلات ماکسول^{۲۲} انتشار موج الکترومغناطیس در یک محیط را براساس خصوصیات ذکر شده در بالا به صورت زیر توصیف می‌کنند [۵]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (۹-۲)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۱۰-۲)$$

$$\nabla \cdot E = q \quad (۱۱-۲)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۱۲-۲)$$

که در این معادلات E شدت میدان الکتریکی، B چگالی شار مغناطیسی، J چگالی جریان رسانشی، H شدت میدان مغناطیسی و D جابجایی الکتریکی و q چگالی بار الکتریکی است. خصوصیات بنیادین رسانندگی (σ)، گذردهی دی الکتریک (ϵ) و تراوایی مغناطیسی (μ)، با استفاده از معادلات زیر با میدان الکتریکی و مغناطیسی موج مرتبط می‌شوند [۶]:

$$D = \epsilon E$$

$$J_{\sigma} = \sigma E$$

$$B = \mu H$$

با استفاده از معادلات بالا می‌توان معادله موج الکترومغناطیس را برای میدان الکتریکی بصورت زیر به- دست آورد [۶]:

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (۱۳-۲)$$

²² Maxwell's equation

این معادله ی دیفرانسیل را می توان به شکل زیر نوشت [۶]:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (۱۴-۲)$$

که در این معادله مقدار k^2 ثابت انتشار بوده و برابر است با:

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon + i \omega \mu \sigma \quad (۱۵-۲)$$

حل معادله دیفرانسیل (۱۴-۲) برای میدان الکتریکی به صورت زیر است [۶]:

$$E = E_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (۱۶-۲)$$

در این معادله k عدد موج است.

این معادله، انتشار موج هارمونیک تخت را در یک محیط همگن و در جهت محور z نشان می دهد.

۲-۲- خصوصیات امواج الکترومغناطیس

خصوصیات اصلی امواج الکترومغناطیسی که در مطالعات **GPR** اهمیت دارند عبارتند از: سرعت^{۲۳}، میرایی (تضعیف)^{۲۴}، امپدانس الکترومغناطیسی^{۲۵} و پاشندگی^{۲۶}. در ادامه توضیحاتی در مورد خصوصیات مذکور ارائه می شود.

²³ Velocity

²⁴ Attenuation

²⁵ Electromagnetic impedance

²⁶ Dispersion

۲-۲-۱- سرعت

سرعت موج الکترومغناطیس در یک محیط تابعی از فرکانس، گذردهی دی‌الکتریک، تراوایی مغناطیسی و رسانندگی است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

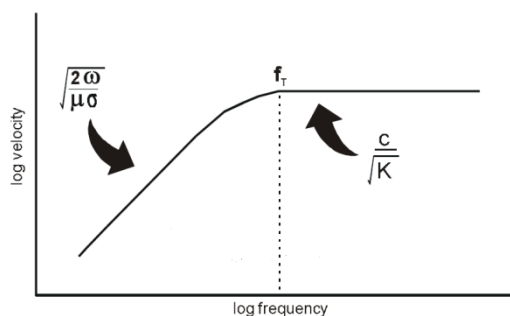
$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_r \omega} \right)^2}}{2} \right)}} \quad (17-2)$$

که در این رابطه C سرعت موج در خلأ است و نسبت جریان رسانشی به جریان جابه‌جایی $\left(\frac{\sigma}{\epsilon_r \omega} \right)$ ، همان‌گونه که قبلاً گفته شد فاکتور اتلاف نامیده می‌شود.

از طرف دیگر در موادی که در کاربردهای **GPR** با آن‌ها سروکار داریم، مانند شن و ماسه‌های تمیز، فاکتور اتلاف بسیار کوچک و نزدیک به صفر است ($\frac{\sigma}{\epsilon_r \omega} = 0$). همچنین برای بیشتر مواد زمینی مقدار عددی تراوایی مغناطیسی نسبی برابر با واحد است ($\mu_r = 1$). در نتیجه معادله (۱۷-۲) به شکل زیر ساده می‌شود [۴]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (18-2)$$

وابستگی سرعت به فرکانس را می‌توان در شکل زیر مشاهده کرد.



شکل ۲-۲: وابستگی سرعت به فرکانس [۱].

همان طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود، در فرکانس‌های بالا نظیر فرکانس‌های مورد استفاده در روش **GPR**، سرعت موج مستقل از فرکانس است و فقط به ثابت دی‌الکتریک (k) بستگی دارد

۲-۲-۲- میرایی

میرایی امواج الکترومغناطیس در گذر از محیط‌های تحت بررسی به سه شکل صورت می‌گیرد:

۱-۲-۲-۲- میرایی در اثر رسانایی

هنگامی که موج یا پالس الکترومغناطیس درون یک ماده منتشر می‌شود، بعد از طی مسیری به طول z دامنه آن (A) نسبت به دامنه اولیه‌اش (A_0) به شکل رابطه‌ی نمایی زیر کاهش می‌یابد [۴].

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (19-2)$$

که در این رابطه α ضریب میرایی بوده و برابر است با [۴]:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \right)^2 + 1} - 1 \right)} \quad (20-2)$$

این ضریب نیز در صورتی که فاکتور اتلاف برابر صفر باشد به صورت زیر ساده می‌شود [۶]:

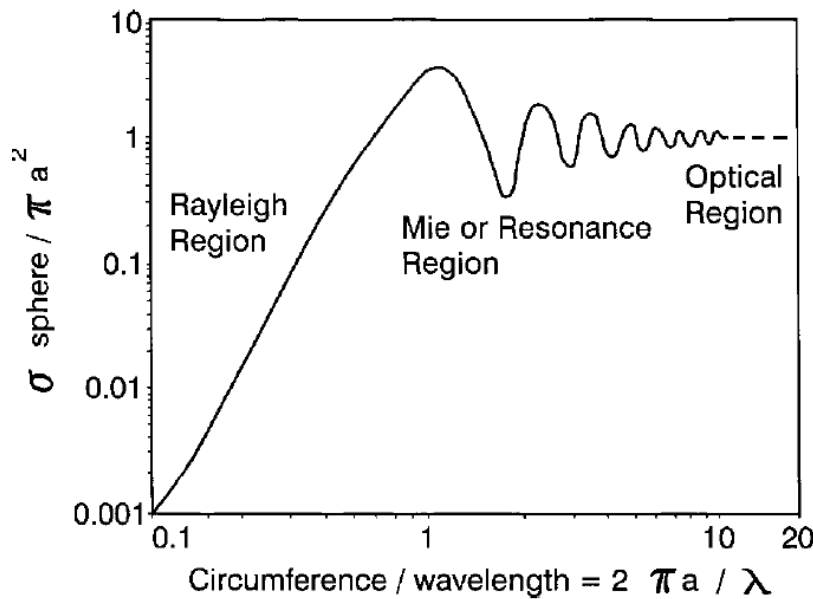
$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (21-2)$$

همان طور که در این رابطه دیده می‌شود رسانندگی بیشترین تأثیر را روی میرایی دارد. بنابراین در رسوباتی نظیر رس‌های مرطوب که از رسانایی الکتریکی بالایی برخوردارند، میرایی پالس‌های **GPR** بسیار قابل توجه خواهد بود.

۲-۲-۲-۲- میرایی ناشی از پراکندگی^{۲۷}

در بحث‌های پیشین مواد همگن در نظر گرفته شدند یا حداقل فرض شد که اندازه ناهمگنی‌ها در مقایسه با طول موج کوچک است. اما مواد زیر سطح زمین به خوبی با این توصیف منطبق نمی‌شوند. خاک‌ها و سنگ‌ها عموماً محتوی ناهمگنی‌های کوچک مقیاس هستند که به طور تصادفی توزیع شده‌اند. هنگامی که فرکانس **GPR** افزایش می‌یابد، طول موج آن به ابعاد اجزاء تشکیل‌دهنده خاک‌ها و سنگ‌ها نزدیک می‌شود. در این حالت پراکندگی انرژی نیز به شدت افزایش می‌یابد [۶]. پراکندگی انرژی در اثر حرکت بارهای الکتریکی جسم تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی تابشی ایجاد می‌شود [۶].

شکل ۲-۳ اثر طول موج تابیده شده بر روی سطح مقطع پراکندگی یک جسم کروی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: رابطه‌ی بین سطح مقطع پراکندگی و طول موج [۶].

در شکل ۲-۳ منظور از سطح مقطع پراکندگی بخشی از سطح مقطع هندسی جسم است که در پراکندگی امواج نقش دارد [۱]. در این شکل در محور عمودی سطح مقطع پراکندگی به سطح مقطع

²⁷ Scattering

هندسی نرمالیزه شده است. در مقابل در محور افقی محیط جسم کروی به طول موج تابش شده نرمالیزه شده است. هنگامی که ابعاد جسم کروی در مقایسه با طول موج کوچک باشد، پاسخ ریلی²⁸ نامیده می‌شود. طول موج‌های مورد استفاده در روش **GPR** نیز در محدوده ریلی قرار می‌گیرند.

همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشخص شده است، در محدوده ریلی سطح مقطع پراکندگی شدیداً به فرکانس بستگی دارد. بنابراین در فرکانس‌های پایین که طول موج رادار نسبت به ابعاد اجزاء تشکیل‌دهنده خاک‌ها و سنگ‌ها بزرگ است، میرایی ناشی از پراکندگی ناچیز است. اما در فرکانس‌های بالا طول موج به ابعاد اجزاء خاک‌ها و سنگ‌ها نزدیک می‌شود و به دنبال آن پراکندگی انرژی به شدت افزایش می‌یابد [۶]. به همین دلیل در بسیاری از موارد میرایی ناشی از پراکندگی، استفاده از آنتن‌های فرکانس بالا را محدود می‌کند [۵].

۲-۲-۲-۳- میرایی ناشی از گسترش هندسی

علاوه بر اتلاف انرژی ناشی از رسانندگی و پراکندگی، گسترش هندسی موج نیز باعث اتلاف انرژی موج می‌شود. انرژی تابش شده از یک آنتن فرستنده **GPR** به شکل یک مخروط بیضوی در حال انبساط در زمین گسترش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که انرژی به‌صورت معکوس با مربع فاصله از آنتن کاهش یابد [۱].

۲-۲-۳- امپدانس الکترومغناطیس

امپدانس الکترومغناطیس (Z) نقش مهمی را در انعکاس و انکسار امواج در مرز بین دو محیط دارد. این کمیت به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 - i \frac{\sigma}{2\epsilon\omega} \right) \quad (2-22)$$

²⁸ Rayleigh

که این معادله نیز در کاربردهای **GPR** به شکل زیر ساده می‌شود [۵].

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (23-2)$$

۲-۲-۴- پاشندگی

پاشندگی یک مفهوم مهم در **GPR** است. پالس **GPR** از مؤلفه‌های فرکانسی مختلف تشکیل شده است. اما بخش عمده انرژی پالس بر روی یک فرکانس متمرکز شده است که به آن فرکانس مرکزی گفته می‌شود. هنگامی که پالس **GPR** به داخل زمین فرستاده می‌شود، مؤلفه‌های فرکانس بالای این پالس دچار تضعیف بیشتری شده و تا عمق کمتری نفوذ می‌کند و در مقابل مؤلفه‌های فرکانس پایین پالس که تضعیف کمتری دارند تا عمق بیشتری نفوذ می‌کنند. به این پدیده پاشندگی گفته می‌شود [۵].

۲-۳- عمق نفوذ

عمق نفوذ پالس به وسیله فرکانس مرکزی **GPR** و رسانایی الکتریکی مواد زیرسطحی کنترل می‌شود و به‌طور کلی فرکانس مرکزی بالای آنتن و رسانندگی مواد زیر سطح زمین موجب کاهش عمق نفوذ پالس‌های **GPR** می‌شوند [۷]. عمق پوسته^{۲۹}، عمقی است که در آن دامنه موج به $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه خود در سطح زمین می‌رسد. اما این عمق نشان-دهنده عمق واقعی نفوذ پالس رادار نیست. عمق پوسته طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\delta = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \quad (24-2)$$

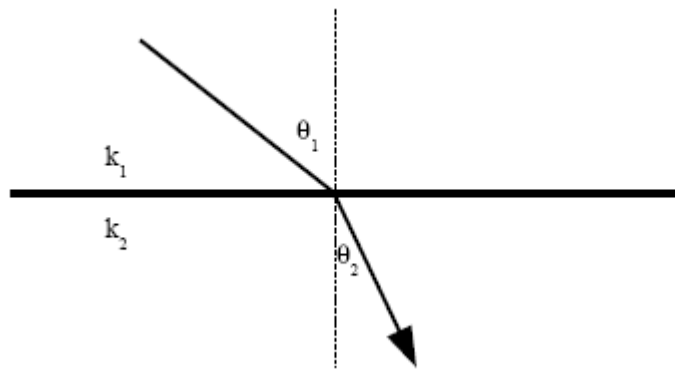
²⁹ Skin depth

۲-۴- قانون اسنل^{۳۰}

قانون اسنل نشان می‌دهد که چطور پالس‌های رادار به هنگام عبور از محیط‌هایی با سرعت‌های مختلف دچار تغییر جهت می‌شوند. از لحاظ ریاضی قانون اسنل به شکل زیر بیان می‌شود [۱]:

$$k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2 \quad (25-2)$$

که k_1 و k_2 عدد موج (مجذور ثابت انتشار) در دو محیط θ_1 و θ_2 به ترتیب زوایای تابش و شکست هستند.



شکل ۲-۴: قانون اسنل [۶].

برای موادی که فاکتور اتلاف پایین است، قانون اسنل از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (26-2)$$

که V_1 و V_2 نشان‌دهنده سرعت انتشار در محیط‌های اول و دوم هستند. قانون اسنل نشان می‌دهد که در آنتن‌های **GPR** جفت شده با هوا که در آنها پالس از هوا وارد زمین می‌شود، به دلیل اختلاف زیاد سرعت پالس در هوا و زمین، تقریباً تمام پالس به صورت عمودی انکسار می‌یابد [۶].

³⁰ Snell's Law

۲-۵- ضرایب انعکاس و انتقال فرسnel^{۳۱}

ضرایب انعکاس و انتقال فرسnel نشان می‌دهد که چطور دامنه امواج الکترومغناطیس در مرز بین دو ماده مختلف تغییر می‌یابد.

در کاربردهای *GPR* همواره از امواج قطبیده استفاده می‌شود که در آنها مؤلفه‌ی میدان الکتریکی همواره موازی با سطح زمین است. ضرایب انعکاس (R) و انتقال (T) این امواج برای موادی که در کاربردهای *GPR* با آنها سروکار داریم، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

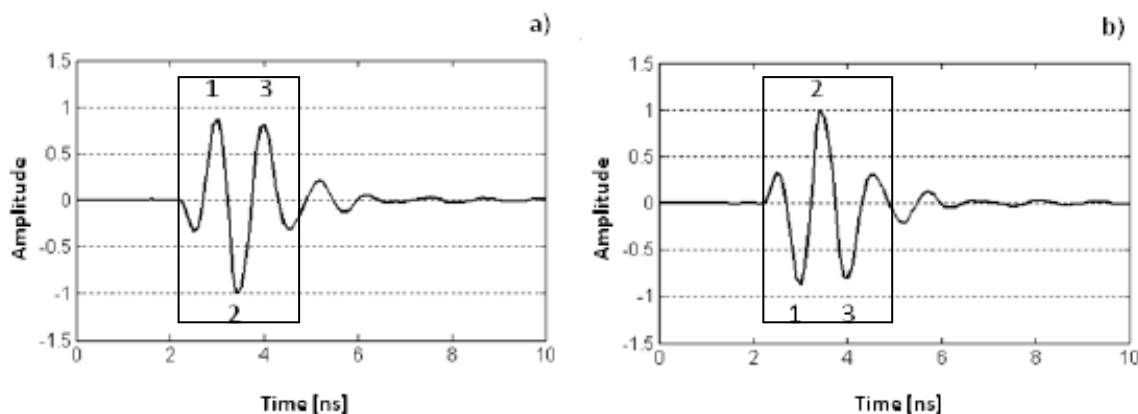
$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (27-2)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (28-2)$$

که در این رابطه ϵ_1 و ϵ_2 به ترتیب ثابت دی‌الکتریک لایه‌های اول و دوم هستند.

۲-۶- شکل پالس *GPR*

در شکل ۲-۵ پالس‌های منفرد *GPR* با قطبیت‌های مختلف نمایش داده شده‌اند.

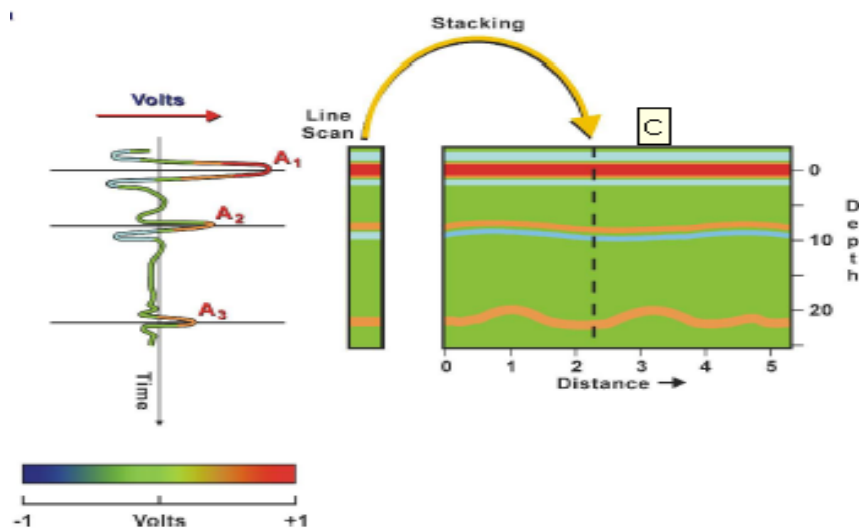


شکل ۲-۵: شکل پالس‌های مثبت (سمت راست) و منفی (سمت چپ) [۳].

³¹ Fresnel's reflection and transmission coefficients

همان‌طور که در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود، هر پالس، شکلی شبیه به «کلاه مکزیک» دارد. پالس نمایش داده شده در سمت راست شکل مذکور یک پالس مثبت است، که قسمت‌های اصلی آن شامل یک پیک مثبت در وسط و دو پیک منفی در طرفین آن است. در پالس منفی (سمت چپ) یک پیک منفی در وسط و دو پیک مثبت در طرفین آن قرار دارند [۳].

در نمایش رنگی مقاطع *GPR* قسمت اصلی هر پالس به وسیله سه نوار رنگی مشخص می‌شود. در شکل ۲-۶ نمایش رنگی پالس‌های *GPR* نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶: نمایش رنگی پالس *GPR* [۳].

همان‌طور که در شکل بالا نمایش داده شده است، پیک مثبت هر پالس با رنگ قرمز و پیک منفی آن با رنگ آبی نمایش داده شده است.

۲-۷- پهنای پالس و قدرت تفکیک عمودی و جانبی^{۳۲}

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، هر پالس *GPR* از محدوده‌ای از مؤلفه‌های فرکانسی مختلف تشکیل شده است. اما بیشتر انرژی پالس بر روی یک فرکانس که همان فرکانس مرکزی است متمرکز می‌شود. در

³² Vertical and lateral resolution

GPR په‌نای هر پالس بر حسب نانوثانیه اندازه‌گیری می‌شود. رابطه بین په‌نای پالس (W) با

فرکانس مرکزی آن (f_c) به شکل زیر است [۱].

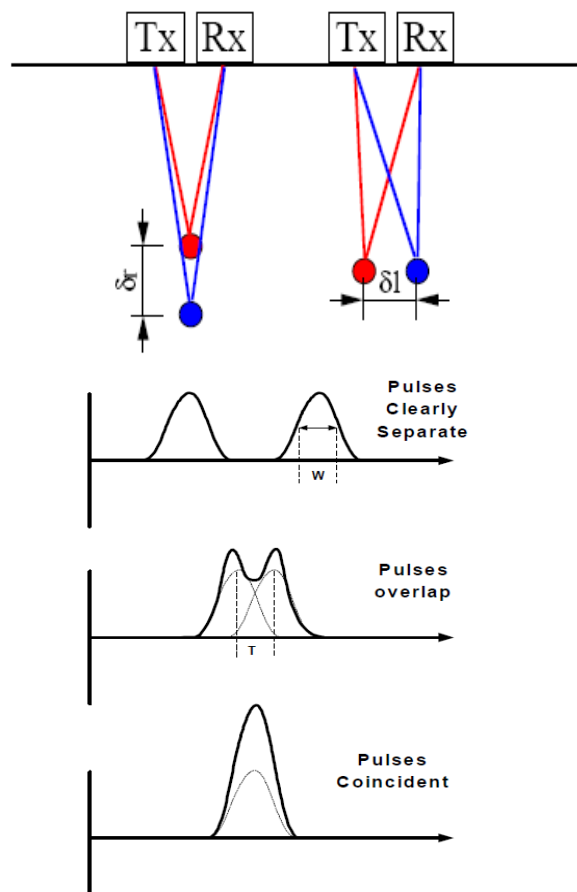
$$W = \frac{1}{f_c} \quad (2-29)$$

بنابراین هرچه فرکانس مرکزی پالس فرستاده شده بالاتر باشد، په‌نای آن کمتر است. هر انعکاس

زیرسطحی شامل یک پالس با په‌نای W است. دو پالس متوالی زمانی از یکدیگر قابل تفکیک‌اند که

اختلاف زمانی بین آنها بزرگتر از $\frac{W}{2}$ باشد [۱]. شکل ۷-۲ مفهوم قدرت تفکیک عمودی و جانبی را

نمایش می‌دهد.



شکل ۷-۲: قدرت تفکیک عمودی و جانبی [۶].

قدرت تفکیک عمودی و جانبی فاصله‌ای است که در آن اختلاف زمانی بین دو پالس متوالی معادل $\frac{W}{2}$

باشد. قدرت تفکیک عمودی (δr) برابر است با [۶]:

$$\delta r = \frac{WV}{4} \quad (30-2)$$

که V سرعت حرکت موج در محیط است.

همین‌طور برای قدرت تفکیک جانبی (δl) خواهیم داشت [۶]:

$$\delta l = \sqrt{\frac{WDV}{2}} \quad (31-2)$$

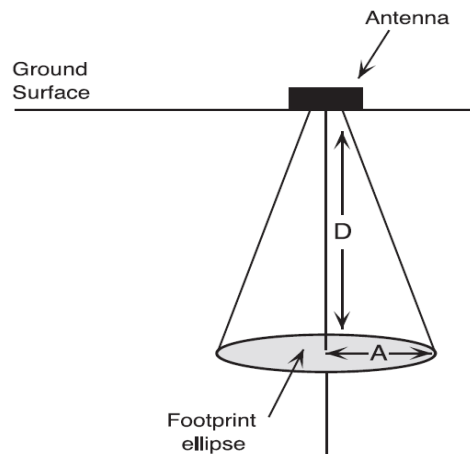
طبق این رابطه قدرت تفکیک جانبی به سرعت (v)، پهنای پالس (w) و فاصله از سیستم (D) بستگی دارد. هرچه فاصله جسم از سیستم GPR بزرگتر باشد، قدرت تفکیک جانبی کمتر خواهد شد.

۲-۱- ردپای^{۳۳} GPR

همان‌طور که قبلاً گفته شد، انتشار انرژی از آنتن فرستنده به شکل یک مخروط بیضوی است. به سطح مقطع این مخروط که به شکل بیضی است، ردپا گفته می‌شود. شعاع بزرگتر بیضی ردپا با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$A = \frac{\lambda_c}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (32-2)$$

³³ Foot print



شکل ۲-۸: ردپای *GPR* [۴].

در رابطه بالا λ_p طول موج مرکزی پالس بوده و برابر است با [۸]:

$$\lambda_p = \frac{v}{f_p} \quad (۳۳-۲)$$

۹-۲- انواع سیستم‌های *GPR*

سیستم‌های *GPR* از لحاظ نوع استفاده به دو دسته آنتن‌های جفت شده با زمین و آنتن‌های جفت شده با هوا تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲-۹-۱- آنتن‌های جفت شده با هوا^{۳۴}

این سیستم‌ها جزو سیستم‌های رادار پالسی هستند و عموماً در محدوده فرکانسی 500MHZ تا $2/5\text{GHZ}$ عمل می‌کنند. عمق نفوذ در این سیستم‌ها بسته به محیط مورد بررسی و فرکانس آنتن، بین $0/5$ تا $0/9$ متر است. در طول برداشت داده‌ها، این آنتن‌ها حدود $0/3$ تا $0/5$ متر بالای سطح زمین قرار می‌گیرند. مهم‌ترین مزیت این آنتن‌ها در این است که پالسی که مستقیماً از طریق هوا از

³⁴ Air coupled antenna

فرستنده به گیرنده می‌رسد، با پالس انعکاس سطحی تداخل نمی‌کند. این موضوع به این آنتن‌ها اجازه می‌دهد که از آن‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات در خصوصیات ماده و کنترل کیفی روسازی استفاده کرد [۶ و ۹]. مزیت دوم این آنتن‌ها در این است که چون در بالای سطح زمین قرار می‌گیرند، سرعت جمع‌آوری داده‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد (تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت). در عوض نقص آشکاری که در این آنتن‌ها وجود دارد، عمق نفوذ پایین آنهاست [۱۰].

۲-۹-۲- آنتن‌های جفت شده با زمین^{۳۵}

این آنتن‌ها در محدوده فرکانس مرکزی ۱۲/۵ مگاهرتز تا ۱۵۰۰ مگاهرتز عمل می‌کنند. عمق نفوذ سیگنال در این آنتن‌ها بسته به جنس مواد مورد بررسی و فرکانس آنتن مورد استفاده، می‌تواند به بالای ۲۰ تا ۵۰ متر برسد [۶].

در طول برداشت داده‌ها، این آنتن‌ها در تماس با سطح زمین و یا در فاصله خیلی نزدیک به آن قرار می‌گیرند. مزیت این آنتن‌ها شامل عمق نفوذ و قدرت تفکیک عمودی بالای این آنتن‌ها نسبت به آنتن‌های جفت شده با هواست. از طرف دیگر تداخل موج مستقیم هوایی با انعکاس سطحی، به دست آوردن اطلاعات کیفی از روسازی را دشوار می‌کند [۱۰ و ۶].

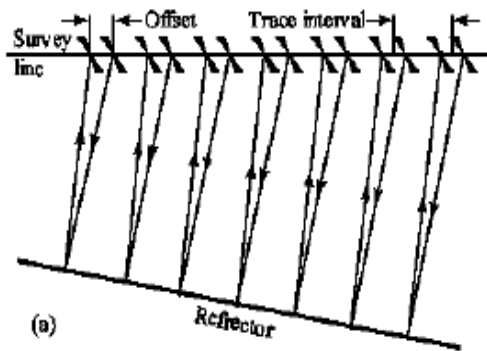
۲-۱۰-۱- انواع روش‌های برداشت داده‌ها در *GPR*

۲-۱۰-۱- روش دور افت مشترک^{۳۶}

این روش جزو معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده در *GPR* است. در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده با فاصله ثابت در طول پروفیل برداشت حرکت داده می‌شوند. در شکل ۲-۹ نحوه برداشت داده‌ها را با روش دور افت مشترک نشان داده شده است [۱].

³⁵ Ground coupled antenna

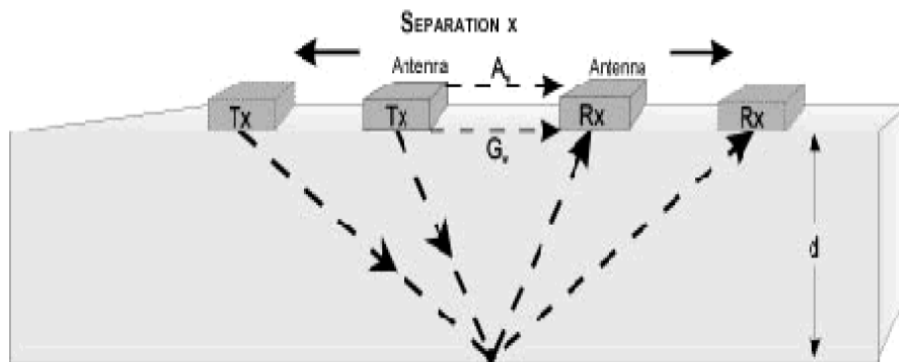
³⁶ Common offset



شکل ۲-۹: روش دور افت مشترک [۱].

۲-۱۰-۲- روش‌های نقطه میانی مشترک و بازتاب و شکست زاویه باز

برخلاف روش پروفیل زنی بازتابی در روش‌های نقطه میانی مشترک^{۳۷} (*CMP*) و بازتاب و شکست زاویه باز^{۳۸} (*WARR*) فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده ثابت نیست. در روش *CMP* آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف یک نقطه ثابت حرکت داده شده و از یکدیگر دور می‌شوند (شکل ۲-۱۰).

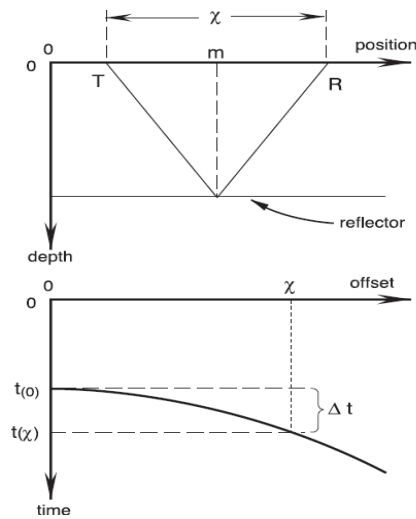


شکل ۲-۱۰: روش *CMP* [۱].

شکل ۲-۱۱، منحنی زمان سیر امواج بازتابی در زمین در برابر فاصله بین آنتن‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این شکل این منحنی به شکل یک هذلولی است.

³⁷ Common Mid Point

³⁸ Wide Angle Reflection and Refraction



شکل ۲-۱۱: هندلوی بدست آمده از روش *CMP* [۱۱].

در روش *CMP* تفسیر مقدماتی به روش $T^2 - X^2$ صورت می‌گیرد (T زمان سیر موج و X فاصله بین آنتن‌ها می‌باشد). در این روش مربع زمان سیر در مقابل مربع فاصله بین آنتن‌ها به صورت یک رابطه خطی است. از روی شیب این خط، مقدار سرعت موج رادار و از روی تقاطع، عمق جسم بازتاب - کننده را می‌توان تخمین زد [۱].

روش *WARR* نیز مشابه با روش *CMP* است؛ با این تفاوت که در روش *WARR* یک آنتن ثابت و آنتن دیگر حرکت داده می‌شود.

۲-۱۰-۳- روش توموگرافی

در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف ساختار قرار می‌گیرند تا خصوصیات مانند سرعت و تضعیف را اندازه‌گیری کنند.

۲-۱۱- پردازش داده‌های *GPR*

به دلیل شباهت روش *GPR* با روش لرزه‌نگاری بازتابی، می‌توان انتظار داشت که بتوان از پردازش‌های لرزه‌ای روی داده‌های *GPR* استفاده کرد. ولی باید توجه داشت که تمام پردازش‌های لرزه‌ای را نمی‌توان روی داده‌های *GPR* اعمال کرد. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود این است که داده‌های *GPR* به‌هنگام پردازش به‌صورت کمیت اسکالر در نظر گرفته می‌شوند، درحالی‌که میدان‌های الکترومغناطیسی که اساس روش *GPR* هستند، کمیت‌های برداری‌اند. پردازش داده‌های *GPR* با توجه به طبیعت برداری میدان‌های الکترومغناطیس، اگرچه هنوز توسعه پیدا نکرده، ولی رو به رشد است [۱].

پردازش‌های داده‌های *GPR* بسیار متنوع و گسترده‌اند، ولی از بین آنها تنها به سه موردی که در این پایان‌نامه از آنها استفاده شده است، اشاره می‌شود.

۲-۱۱-۱- تصحیح اشباع سیگنال^{۳۹}

اولین پردازش شامل حذف مؤلفه‌های فرکانسی خیلی پایین از روی داده‌هاست. پالس‌های فرستاده شده به زمین، جریاناتی با فرکانس پایین را در زمین القا می‌کنند که به کندی کاهش می‌یابند. این جریانات، بازتاب‌های با فرکانس بالا را می‌پوشانند یا اصطلاحاً باعث ایجاد *WOW* روی فرکانس‌های اصلی می‌شوند. فرایند حذف فرکانس‌های پایین از روی داده‌ها و حفظ سیگنال‌های اصلی به *DEWOW* معروف است [۱۲].

³⁹ DEWOW

۲-۱۱-۲-۲- پردازش بهره^{۴۰}

شدت سیگنال‌های رادار با افزایش عمق نفوذ کاهش می‌یابد. هدف از پردازش بهره تقویت سیگنال‌های ضعیفی است که از اعماق بیشتر می‌آیند. پردازش بهره انواع مختلفی دارد که در ادامه به دو مورد از آن‌ها اشاره می‌شود:

الف- کنترل بهره اتوماتیک (AGC)^{۴۱}

کنترل بهره اتوماتیک یا *AGC* تلاش می‌کند که با به‌کار بردن یک تابع بهره که به‌طور معکوس متناسب با شدت سیگنال است، تمام سیگنال‌ها را همسان‌سازی کند. باید توجه داشت که *AGC* دامنه یا شدت نسبی سیگنال‌های بازتابی را حفظ نمی‌کند، بنابراین در استفاده از این بهره نمی‌توان درک قابل اعتمادی در رابطه با شدت هر سیگنال خاص نسبت به دیگر سیگنال‌ها داشت [۱۲].

ب- جبران گسترش هندسی و نمایی (SEC)^{۴۲}

هدف از این بهره جبران افت انرژی ناشی از گسترش کروی موج در محیط و اتلاف نمایی انرژی ناشی از رسانایی است. پالس‌های رادار بطور نمایی تضعیف می‌شوند و *SEC* نیز یک بهره نمایی است. برخلاف *AGC* در این بهره می‌توان دامنه یا شدت سیگنال‌ها را به‌طور نسبی با یکدیگر مقایسه کرد [۱۲].

⁴⁰ Gain

⁴¹ Automatic Gain Control (AGC)

⁴² Spreading and Exponential Compensation (SEC)

۲-۱۱-۳- پردازش واهمامیخت (واپیچش)^{۴۳}

این پردازش از قوانین پردازش لرزه‌ای استاندارد پیروی می‌کند و با استفاده از فرکانس مرکزی *GPR* موج کشیده‌ی رادار را فشرده کرده و اصطلاحاً آن را به اسپایک^{۴۴} تبدیل می‌کند. این امر می‌تواند در بهبود قدرت تفکیک عمودی داده‌ها مؤثر باشد [۱۲].

۲-۱۲- ضخامت و خصوصیات کیفی لایه‌های روسازی

تخمین واقعی ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده روسازی و تعیین محل نقاط ضعیف، پارامترهای مهمی برای مهندسين راه و ترابری هستند. در روسازی‌های جدید اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها برای اطمینان از این است که لایه‌های روسازی مطابق با خصوصیات طراحی ساخته شوند. برای مثال اداره حمل و نقل ویرجینیا ماکزیمم^{۴۵} خطا در ضخامت لایه آسفالت را ± 5 میلی‌متر و در لایه‌های دانه‌ای ± 25 میلی‌متر تعیین کرده است و در صورتی که ضخامت لایه‌ها مطابق با استاندارد نباشد، پیمانکار جریمه خواهد شد [۱۳]. خصوصیات کیفی روسازی نیز از قبیل درصد حفرات هوای آسفالت و درصد رطوبت اساس، چنان‌که در آینده اشاره خواهد شد، نقش مهمی را در پایداری و دوام آن دارند. لذا در ادامه به بررسی نحوه‌ی تعیین پارامترهای فوق‌الذکر با استفاده از روش *GPR* پرداخته می‌شود.

۲-۱۳- انواع روسازی

روسازی‌ها براساس نحوه ساخت به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند [۱۴]:

⁴³ Deconvolution

⁴⁴ Spike

⁴⁵ Virginia Transportatoin Department

الف- روسازی انعطاف پذیر^{۴۶}

در این نوع روسازی لایه پوشش رویی از یک لایه مخلوط آسفالت داغ^{۴۷} (*HMA*) متراکم ساخته شده است و یک سطح صاف و مقاوم را تشکیل می‌دهد. در زیر لایه آسفالت، یک لایه اساس قرار دارد. این لایه از خرده سنگ‌های آتش‌فشانی یا مواد پایدار دیگر ساخته شده است. لایه‌ی زیر اساس^{۴۸} یک لایه

اختیاری است که برای صرفه‌جویی اقتصادی از مواد ارزان‌تری نسبت به لایه اساس ساخته می‌شود. موضوع این پایان‌نامه بررسی این نوع روسازی‌ها با روش *GPR* است.

ب- روسازی سخت^{۴۹}

در این نوع روسازی یک لایه بتنی روی سطح خاک قرار می‌گیرد و لایه‌های اساس و زیر اساس اختیاری هستند.

ج- روسازی مرکب^{۵۰}

این روسازی ترکیبی از لایه‌های آسفالت و بتن است.

۲-۱۴- تعیین گذردهی دی‌الکتریک لایه‌های روسازی

برای تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی لایه‌های روسازی ابتدا باید ثابت دی‌الکتریک آن‌ها را تعیین کرد. روش‌های در دسترس *GPR* برای تعیین ثابت دی‌الکتریک مواد مورد استفاده در روسازی، شامل دو روش بازتاب سطحی و *CMP* است.

⁴⁶ Flexible pavement

⁴⁷ Hot Mix Asphalt

⁴⁸ Subgrade

⁴⁹ Rigid pavement

⁵⁰ Composite pavement

۲-۱۴-۱- روش بازتاب سطحی

بازتاب سطحی، روشی است که به‌طور عمده برای تعیین ثابت دی‌الکتریک لایه‌های روسازی استفاده می‌شود. در این روش برای تعیین ثابت دی‌الکتریک لایه اول یعنی لایه آسفالتی، دامنه پالس بازتاب شده از سطح آسفالت با دامنه پالس بازتاب شده از یک صفحه فلزی (به عنوان بازتاب کننده کامل) مقایسه می‌شود [۱۵]. برای مثال اگر دامنه پالس بازتاب شده از سطح آسفالت A_0 و دامنه پالس بازتاب شده از سطح صفحه فلزی A_m باشد، ثابت دی‌الکتریک لایه آسفالتی (ϵ_a) از رابطه زیر به دست می‌آید [۳ و ۱۴].

$$\epsilon_a = \frac{A_m + A_0}{A_m - A_0} \quad (2-34)$$

با فرض این‌که مقدار تضعیف پالس در لایه آسفالتی ناچیز باشد، ثابت دی‌الکتریک لایه‌ی دوم (اساس) یعنی ϵ_b را می‌توان طبق رابطه زیر به دست آورد [۳ و ۱۴].

$$\epsilon_b = \epsilon_a \left(\frac{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right) + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right) - \frac{A_1}{A_m}} \right)^2 \quad (2-35)$$

در این رابطه A_1 دامنه پالس بازتاب شده از سطح بالایی لایه اساس است. ثابت دی‌الکتریک لایه‌ی n ام را نیز می‌توان طبق معادله زیر تعیین کرد [۱۴].

$$\epsilon_b = \epsilon_a \left[\frac{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \gamma_i \frac{A_i}{A_m} + \frac{A_{n-2}}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \gamma_i \frac{A_i}{A_m} - \frac{A_{n-2}}{A_m}} \right]^2 \quad (2-36)$$

که در این رابطه A_i دامنه‌ی پالس بازتاب شده از i امین لایه و γ_i ضریب انعکاس بین i امین و $i+1$ امین لایه است [۱۴].

$$\gamma_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (37-2)$$

برای استفاده از این روش باید به نکات زیر توجه داشت:

(۱) استفاده از روش بازتاب سطحی برای تعیین ثابت دی‌الکتریک لایه‌ها در صورتی ممکن است

که آنتن مورد استفاده از نوع جفت شده با هوا باشد [۳ و ۱۳].

(۲) در هنگام استفاده از این روش لایه‌های روسازی همگن فرض می‌شوند [۱۳].

(۳) در هنگام استفاده از این روش سطح روسازی باید کاملاً خشک باشد. بنابراین به هنگام

بارندگی استفاده از این روش ممکن نیست [۱۴].

(۴) استفاده از این روش بر روی روسازی‌های جدید به نتیجه‌ی مطلوب می‌رسد و در روسازی -

های قدیمی به‌طور معمول با خطا همراه است [۱۴].

۲-۱۴-۲- روش CMP

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف یک نقطه ثابت

حرکت داده می‌شوند. با این روش می‌توان سرعت حرکت پالس در محیط را به‌دست آورد. با مشخص

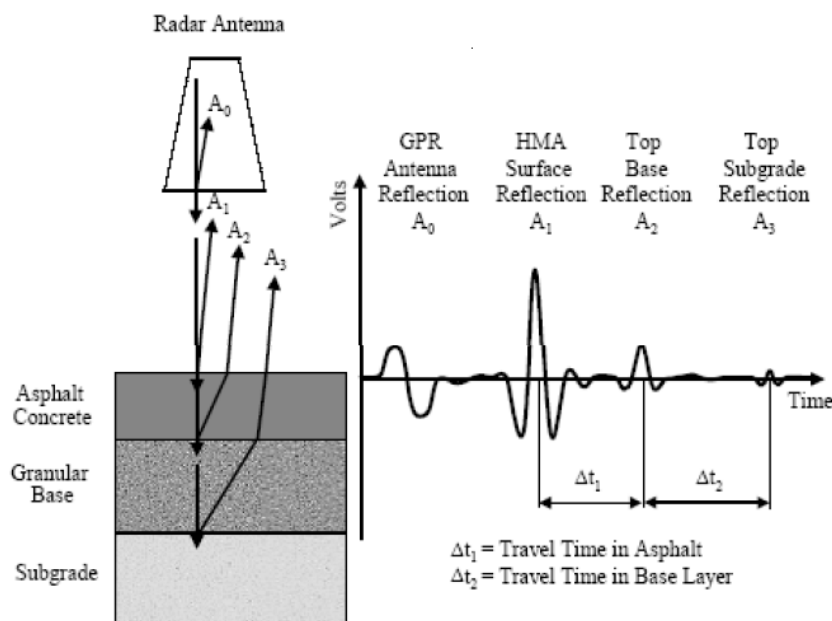
بودن سرعت موج در محیط، ثابت دی‌الکتریک طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۵].

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (38-2)$$

۱۵-۲- تعیین ضخامت لایه‌های روسازی به کمک روش *GPR*

در روسازی‌های جدید الاحداث تعیین ضخامت لایه آسفالت و لایه‌های زیرین آن، برای تعیین مدول‌های ارتجاعی آن‌ها با استفاده از روش انحراف‌سنج وزنه‌ی افتان^{۵۱} (*FWD*) اهمیت فوق‌العاده دارد. در روش *FWD* از طریق سقوط یک وزنه از ارتفاع مشخص، یک نیروی آنی را به سطح روسازی وارد کرده و انحراف ناشی از این نیروی آنی را در سطح روسازی اندازه‌گیری می‌کنند. با تغییر مقدار وزنه و ارتفاع سقوط آن، این انحراف را برای نیروهای آنی مختلف اندازه‌گیری می‌کنند. با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از این روش و ضخامت به‌دست آمده از داده‌های *GPR* می‌توان مدول‌های ارتجاعی لایه‌های روسازی را تعیین کرد [۱۴].

در روش *GPR*، آنتن فرستنده پالس‌های الکترومغناطیس را به داخل زمین می‌فرستد. در مرز بین لایه‌های روسازی، بخشی از انرژی پالس بازتاب شده و توسط آنتن گیرنده دریافت و سپس ثبت می‌شود. شکل ۱۲-۲ پالس‌های مشخص بازتابی از لایه‌های مختلف روسازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۲: پالس‌های تیپیک بازتاب شده از لایه‌های روسازی [۱۴].

⁵¹Falling Weight Deflectometry

در شکل ۲-۱۲، A_1 دامنه پالس بازتاب شده از سطح آسفالت و A_2 و A_3 به ترتیب دامنه پالس بازتاب شده از سطح بالایی لایه‌های اساس و زیراساس هستند. دامنه A_0 مربوط به پالس مستقیمی است که از فرستنده به گیرنده می‌رسد. سرعت پالس در زمین طبق رابطه ۲-۱۸ به دست می‌آید:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ثابت دی‌الکتریک مربوط به لایه‌های آسفالت و اساس را می‌توان به کمک روش بازتاب سطحی به دست آورد؛ سپس با داشتن سرعت پالس (v) و فاصله زمانی ثبت شده بین دو پالس متوالی بازتاب شده از دو سطح فوقانی و تحتانی هر لایه (ΔT)، می‌توان ضخامت آن را به صورت زیر به دست آورد:

[۱۳]:

$$\Delta Z = \frac{V \Delta T}{2} \quad (2-39)$$

تعیین ضخامت لایه‌های روسازی با روش **GPR** در جاده‌های جدید الاحداث به نتیجه مطلوب می‌رسد. اما در جاده‌های قدیمی به دلیل تدریجی بودن مرز بین لایه‌ها، تعیین ضخامت چندان دقیق نیست [۱۴].

۲-۱۶- تعیین میزان حفرات آسفالت

میزان حفرات آسفالت یکی از مهمترین خصوصیات مهندسی است و به تعداد دفعاتی که آسفالت با غلتک فشرده می‌شود بستگی دارد. این فاکتور نقش مهمی را در طول عمر آسفالت و مقاومت آن در برابر ترافیک ایفا می‌کند. طبق قوانین مؤسسه آسفالت ایالات متحده^{۵۲}، میزان حفرات هوای موجود در آسفالت باید بین ۳ تا ۷ درصد باشد. به طوری که درصد حفرات هوای ۸ درصد و بالاتر باعث بوجود

⁵² U.S. Asphalt Institute

آمدن حفرات به هم پیوسته‌ای از هوا در داخل آسفالت می‌شود. وجود این حفرات به هم پیوسته موجب نفوذ هوا و رطوبت به داخل آسفالت و کاهش عمر روسازی می‌شود. از طرف دیگر اگر حفرات هوای آسفالت زیر ۳ درصد باشد، در آب و هوای گرم، فضای کافی برای انبساط قیر موجود در آسفالت وجود ندارد و در این حالت، آسفالت حالت پلاستیک و ناپایدار به خود می‌گیرد و اصطلاحاً قیرزده می‌شود [۲]. مدل‌های مختلفی برای ایجاد ارتباط بین ثابت دی‌الکتریک آسفالت و ثابت دی‌الکتریک مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن وجود دارد. در ادامه به معرفی چند مدل پرداخته می‌شود.

۲-۱۶-۱- مدل شاخص انکساری ترکیبی $CRIM^{\alpha}$

طبق این مدل ثابت دی‌الکتریک یک ماده ناهمگن را می‌توان به صورت تابعی از مقادیر ثابت دی‌الکتریک و سهم حجمی هر یک از مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن فرض کرد، یعنی [۲]:

$$\epsilon_m^{\alpha} = \sum_{i=1}^n V_i \epsilon_i^{\alpha} \quad (40-2)$$

در این رابطه ϵ_m ثابت دی‌الکتریک توده ماده ناهمگن و V_i درصد حجمی هر یک از مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن و ϵ_i گذردهی دی‌الکتریک هر یک از مؤلفه‌هاست. α یک متغیر تجربی است که به طور تئوری از ۱- تا ۱+ تغییر می‌کند. برای ماده‌ای مانند آسفالت که از سه مؤلفه ی مصالح سنگی، قیر و هوا تشکیل شده است، α برابر ۰/۵ بوده و مدل بالا به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\sqrt{\epsilon_{HMA}} = V_b \sqrt{\epsilon_b} + V_{agg} \sqrt{\epsilon_{agg}} + V_a \sqrt{\epsilon_a} \quad (41-2)$$

که در این رابطه هر یک از پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شود:

ϵ_{HMA} : ثابت دی‌الکتریک توده آسفالت

ϵ_b : ثابت دی‌الکتریک قیر

⁵³ Complex Refraction Index Model

ثابت دی‌الکتریک مصالح سنگی : ϵ_{agg}

ثابت دی‌الکتریک هوا : ϵ_a

درصد حجمی هوا : V_a

درصد حجمی مصالح سنگی : V_{agg}

درصد حجمی قیر : V_b

۲-۱۶-۲ فرمول ترکیبی ریلی^{۵۴}

این فرمول به شکل زیر ارائه شده است [۲]:

$$\frac{\epsilon_{HMA} - \epsilon_b}{\epsilon_{HMA} + 2\epsilon_b} = V_{agg} \frac{\epsilon_{agg} - \epsilon_b}{\epsilon_{agg} + 2\epsilon_b} + V_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{\epsilon_a + 2\epsilon_b} \quad (۴۲-۲)$$

۲-۱۶-۳ مدل ترکیبی بوچر^{۵۵}

این مدل به شکل زیر است [۲]:

$$\frac{\epsilon_{HMA} - \epsilon_b}{3\epsilon_{HMA}} = V_{agg} \frac{\epsilon_{agg} - \epsilon_b}{\epsilon_{agg} + 3\epsilon_{HMA}} + V_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{\epsilon_a + 3\epsilon_{HMA}} \quad (۴۳-۲)$$

از بین مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آسفالت، درصد حفرات هوای موجود در آسفالت بیشترین تأثیر را روی ثابت دی‌الکتریک آن دارد [۲]. به همین دلیل می‌توان بین ثابت دی‌الکتریک آسفالت به دست آمده از طریق انعکاس سطحی و درصد حفرات هوای موجود در آن رابطه برقرار کرد. اولین تلاش در این زمینه در تابستان ۱۹۹۲ توسط محققین فنلاندی و به سرپرستی سارنکتو، طی پروژه‌ای که توسط

⁵⁴ Rayleigh mixing formula

⁵⁵ Butcher mixing model

مرکز توسعه فناوری فنلاند^{۵۶} حمایت مالی شده بود، انجام گرفت. قسمتی از این تحقیقات، آزمایش-هایی بود که به منظور بررسی ارتباط بین ثابت دی‌الکتریک آسفالت و محتوای هوای آن انجام شد. نتایج کار محققین فنلاندی نشان داد که یک رابطه نمایی بین محتوای حفرات هوا (V) و ثابت دی-الکتریک آسفالت (ϵ) به شکل زیر وجود دارد [۲].

$$V\% = a e^{-bs} \quad (۴۴-۲)$$

در این رابطه a و b ضرائب ثابت هستند.

به دنبال آن در ایالات متحده در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ آزمایش‌های دیگری در مؤسسه حمل و نقل تگزاس^{۵۷} (TTI) برای بررسی خصوصیات دی‌الکتریک مواد مورد استفاده در روسازی انجام گرفت. در این مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی با درجات مختلف تراکم تهیه شدند، که در تمام آن‌ها مقدار قیر یکسان بود. سپس مقادیر ثابت دی‌الکتریک این نمونه‌ها به کمک آنتن GPR با فرکانس مرکزی $1GHZ$ اندازه‌گیری شدند. نتایج به دست آمده به‌طور واضحی اعتبار تئوری سارنکتو را نشان دادند. مطالعات انجام شده در TTI نشان داد که گذشت زمان تأثیری بر ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های آزمایشگاهی ندارد. همچنین این مطالعات نشان داد که مقادیر دی‌الکتریک مصالح سنگی آسفالت در حالت خشک بین $۴/۵$ تا $۶/۴$ تغییر می‌کند [۲].

آزمایش‌های بعدی در این مؤسسه نشان داد که مقدار ثابت دی‌الکتریک برای انواع مختلف قیر و همچنین برای یک نوع قیر با گرانی‌های مختلف، نوسانات و تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد و همواره در محدوده $۲/۶$ تا $۲/۸$ باقی می‌ماند. در این مؤسسه اثر محتوای قیر نیز مطالعه شد و مشخص شد که تغییرات کوچک در مقدار قیر روی ثابت دی‌الکتریک آسفالت تأثیری ندارد [۱۴]. القادی نشان داد که مقدار حقیقی ثابت دی‌الکتریک آسفالت بین ۲ تا ۶ است. مقادیر بزرگتر از این محدوده نشان-دهنده وجود رطوبت در آسفالت و مقدار پایین‌تر از این محدوده نشان‌دهنده زیاد بودن حفرات هوا و یا

⁵⁶ Finnish Technology Development Center

⁵⁷ Texas Transportation Institute

غیر معمول بودن دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در آسفالت است. بخش موهومی ثابت دی-الکتریک نیز در آسفالت بسیار ناچیز بوده و بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۶ در تغییر است. این مطلب نشان‌دهنده پایین بودن تضعیف انرژی پالس در آسفالت است [۲].

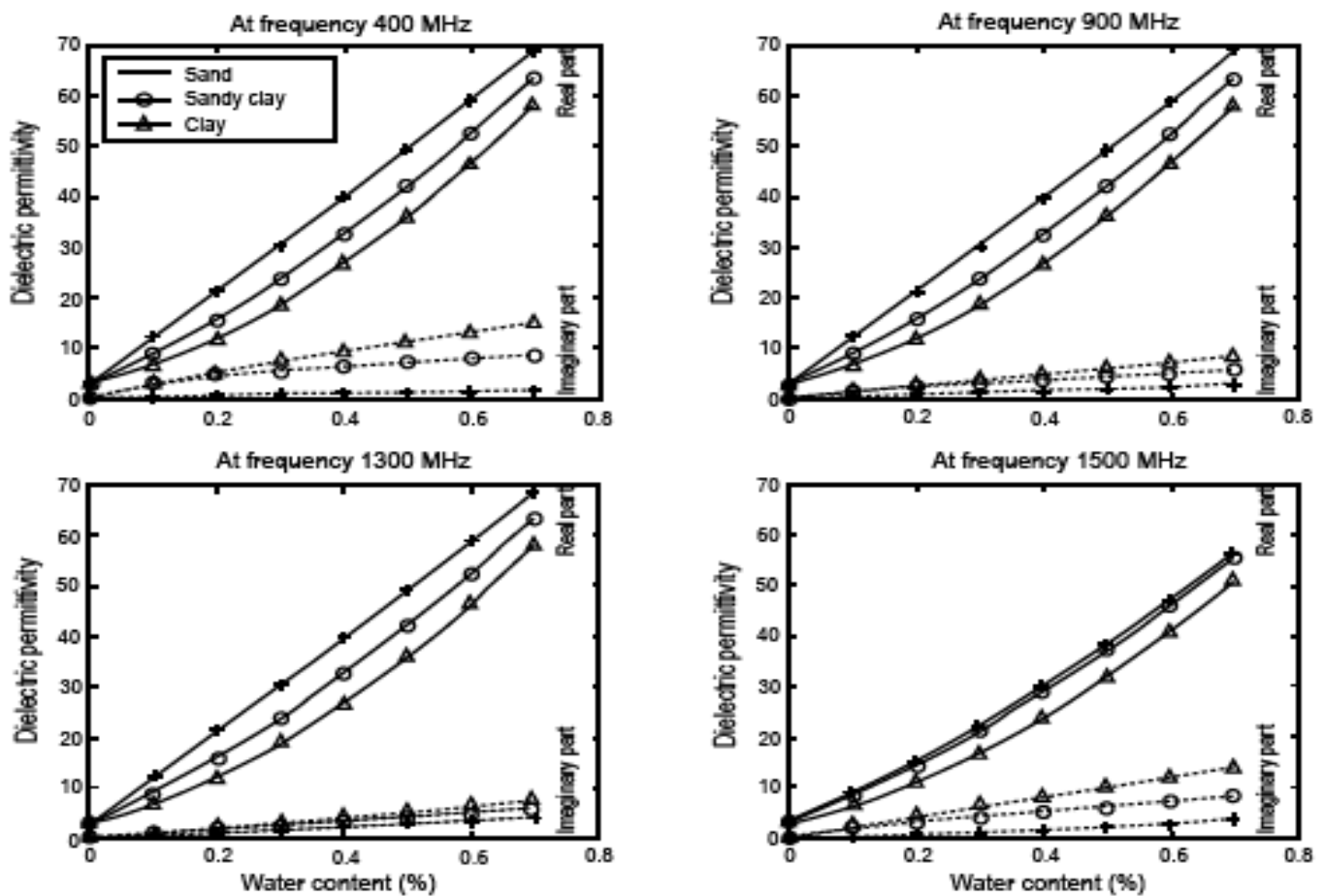
۲-۱۷- مقادیر دی‌الکتریک راه‌های آسفالتی قدیمی

در طول ده سال و بعد از برداشت‌های *GPR* بر روی هزاران کیلومتر از جاده‌های آسفالتی قدیمی و جدید، فهم و درک بهتری از تاریخچه تغییرات ثابت دی‌الکتریک جاده‌های آسفالتی به دست آمد. از زمان شروع آسفالت تا حدود ۵ تا ۱۰ سال بعد از آن مقدار ثابت دی‌الکتریک آسفالت با یک نرخ رشد کم افزایش می‌یابد. سرعت رشد ثابت دی‌الکتریک به حجم ترافیک بستگی دارد. چند سال قبل از آن که جاده شروع به ترک خوردن کند، مولکول‌های آب بین قیر و دانه‌ها نفوذ می‌کنند و پیوند بین آنها را می‌شکنند. این امر باعث می‌شود که هم بخش حقیقی و هم بخش موهومی ثابت دی‌الکتریک افزایش پیدا کند. وقتی که جاده شروع به ترک خوردن می‌کند، به دلیل ورود هوا به داخل درز و شکاف‌ها، مقدار ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد [۱۴].

۲-۱۸- تعیین محتوای رطوبت اساس

یکی دیگر از خصوصیات مهم روسازی مورد توجه مهندسين راه‌سازی، محتوای رطوبت خاک اساس آسفالت است. محتوای رطوبت اساس آسفالت از این لحاظ مهم است که ظرفیت باربری اساس آسفالت که توسط روش *FWD* تعیین می‌شود بطور عمده توسط محتوای رطوبت آن کنترل می‌شود [۱۵]. تخمین محتوای رطوبت اساس با استفاده از داده‌های *GPR* امکان‌پذیر است. این امر به کمک تعیین گذردهی دی‌الکتریک خاک با استفاده از روش انعکاس سطحی انجام می‌گیرد. لذا در ابتدا به بررسی عوامل موثر بر گذردهی دی‌الکتریک خاک پرداخته می‌شود.

عوامل مؤثر بر گذردهی دی‌الکتریک خاک شامل محتوای آب، بافت خاک (درشت دانه یا ریزدانه)، چگالی توده خاک و فرکانس مرکزی آنتن است. شکل ۲-۱۳ تأثیر سه عامل محتوای آب، بافت و فرکانس را بر روی هر دو بخش حقیقی و موهومی گذردهی دی‌الکتریک خاک نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳: اثر سه عامل محتوای آب، بافت و فرکانس بر روی گذردهی دی‌الکتریک خاک [۱۶].

همانطورکه در شکل ۲-۱۳ ملاحظه می‌شود، محتوای آب بیشترین تأثیر را بر روی هر دو بخش حقیقی و موهومی گذردهی دی‌الکتریک دارد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که برای خاک‌های ماسه‌ای رابطه بین بخش حقیقی گذردهی دی‌الکتریک و محتوای آب به حالت خطی نزدیک‌تر می‌شود [۱۶].

باید توجه داشت که آب موجود در خاک به دو قسمت آب پیوندی و آب آزاد تقسیم‌بندی می‌شود، که این دو از لحاظ خصوصیات دی‌الکتریک با یکدیگر متفاوتند. آب پیوندی که در تماس خیلی

نزدیک با ذرات خاک است، ثابت دی‌الکتریکی در حدود ۴ دارد. مقدار این آب با افزایش درصد بخش ریزدانه‌ی خاک افزایش می‌یابد. این درحالی است ثابت دی‌الکتریک آب آزاد بین دانه‌ها برابر ۸۱ است [۱۷].

اثر افزایش چگالی توده خاک به صورت افزایش در ثابت دی‌الکتریک خاک است. دیرکسن و داسبرگ^{۵۸} یک گروه از منحنی‌های محتوای رطوبت را برای محدوده چگالی توده‌ای از $0.5 \frac{gr}{cm^3}$ تا $1.55 \frac{gr}{cm^3}$ توسعه دادند. ثابت دی‌الکتریک خاک به فرکانس موج الکترومغناطیس نیز بستگی دارد. به طوری که با افزایش فرکانس، بخش حقیقی گذردهی دی‌الکتریک خاک کاهش می‌یابد. تغییرات بخش موهومی گذردهی دی‌الکتریک در مقابل تغییرات فرکانس اعمالی برای خاک‌های ماسه‌ای جزئی است. این تغییرات در صورتی که محتوای رطوبت و رس افزایش یابد، اهمیت پیدا می‌کنند [۱۷].

از دیگر عوامل مؤثر روی ثابت دی‌الکتریک خاک می‌توان به خصوصیات هندسی ذرات خاک، دما و واکنش‌های الکتروشیمیایی درون خاک اشاره کرد [۱۸]. مدل‌های زیادی برای ایجاد ارتباط بین ثابت دی‌الکتریک خاک با محتوای آب آن وجود دارد، در اینجا فقط به دو مورد اشاره می‌شود.

۲-۱۸-۱- مدل تاپ

معادله ارائه شده توسط تاپ و همکاران^{۵۹} ثابت دی‌الکتریک خاک (ϵ) را با محتوای حجمی رطوبت آن (θ_v) به صورت زیر مرتبط می‌کند [۱۸]:

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \theta_v - 5.5 \times 10^{-4} \theta_v^2 + 4.3 \times 10^{-3} \theta_v^3 \quad (2-45)$$

⁵⁸ Dirksen, Dasberg

⁵⁹ Top, et al

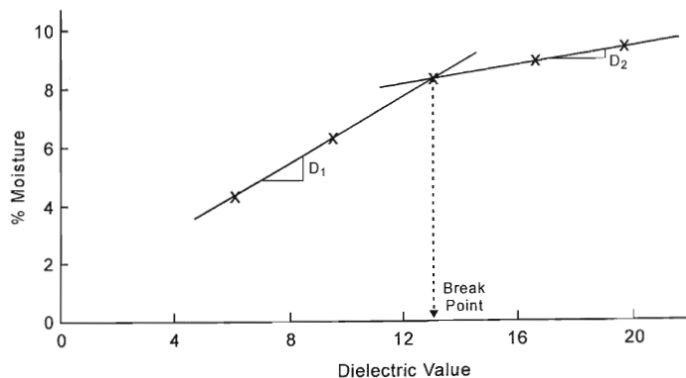
۲-۱۸-۲- مدل شاخص انکساری ترکیبی (CRIM)

مدل *CRIM* برای تعیین محتوای رطوبت خاک، توسط راز و همکاران^{۶۰} به شکل زیر ارائه شده است [۱۸].

$$\sqrt{\epsilon_b} = \phi(1 - S)\sqrt{\epsilon_b} + \phi S\sqrt{\epsilon_w} + (1 - \phi)\sqrt{\epsilon_{agg}} \quad (۲-۴۶)$$

که در این رابطه Φ و S و θ_V به ترتیب معادل با تخلخل، درجه اشباع شدگی از آب و درصد حجمی آب است و $\epsilon_b, \epsilon_{agg}, \epsilon_w, \epsilon_a$ نیز به ترتیب برابر با ثابت دی‌الکتریک هوا، آب، دانه‌های خاک و توده-ی خاک هستند.

در اواسط ۱۹۹۰ یکسری از آزمایش‌ها روی محدوده خاصی از اساس آسفالت‌ها در تگزاس انجام شد. رابطه بین محتوای آب و ثابت دی‌الکتریک اساس به صورت دو بخش خطی به دست آمد که هر کدام از این دو بخش شیب و عرض از مبدأ خاص خود را دارند. در شکل ۲-۱۴ رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و محتوای رطوبت نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۴: رابطه‌ی بین محتوای رطوبت اساس و ثابت دی‌الکتریک آن [۱۴].

مقایسه دو بخش خطی نمایش داده شده در شکل ۲-۱۴ نشان می‌دهد که نرخ رشد ثابت دی‌الکتریک در برابر میزان رطوبت برای درصد رطوبت‌های بالای ۹ درصد بیشتر از درصد رطوبت کمتر از ۹ درصد است.

⁶⁰ Roth, et al

فصل (۳)

تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت

و خاک زیر سطحی آن

در محوطه داخلی دانشگاه صنعتی شاهرود

۱-۳- مقدمه

در این مطالعه از سیستم رادار *Noggin Plus* ساخت شرکت *Sensors & Software* کشور کانادا برای تعیین ضخامت لایه آسفالت و اساس و نیز کنترل کیفی آن‌ها استفاده شد. فرکانس مرکزی این آنتن ۲۵۰ مگاهرتز و از نوع جفت شده به زمین می‌باشد. مراحل برداشت، پردازش و تفسیر داده‌ها به شرح زیر است.

۲-۳- برداشت داده‌ها

برداشت داده‌ها به صورت پروفیل‌هایی عمود بر مسیرهای دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. تعداد کل پروفیل‌های برداشت شده ۳۰ عدد و فاصله بین آنها ۵۰ متر است.

جدول ۱-۳ مختصات جغرافیایی نقطه شروع پروفیل‌های برداشت شده به همراه طول هر یک از آن‌ها و شکل ۱-۳ موقعیت تعدادی از این پروفیل‌ها را در عکس ماهواره ای نشان می‌دهند.

جدول ۱-۳: مختصات جغرافیایی و طول پروفیل‌های برداشت شده.

شماره پروفیل	طول پروفیل (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۱۵/۷	$E 054^{\circ} 56' 06.2''$	$N 36^{\circ} 23' 17.6''$
۲	۱۷/۵	$E 054^{\circ} 56' 08.0''$	$N 36^{\circ} 23' 18.0''$
۳	۹	$E 054^{\circ} 56' 09.3''$	$N 36^{\circ} 23' 18.8''$
۴	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 10.4''$	$N 36^{\circ} 23' 19.1''$
۵	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 11.9''$	$N 36^{\circ} 23' 20.4''$
۶	۶/۸	$E 054^{\circ} 56' 12.7''$	$N 36^{\circ} 23' 21.5''$
۷	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 14.4''$	$N 36^{\circ} 23' 23.3''$
۸	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 15.6''$	$N 36^{\circ} 23' 24.5''$
۹	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 16.8''$	$N 36^{\circ} 23' 25.9''$
۱۰	۹/۱۵	$E 054^{\circ} 56' 17.6''$	$N 36^{\circ} 23' 27.2''$
۱۱	۹/۵۵	$E 054^{\circ} 56' 19''$	$N 36^{\circ} 23' 28.7''$
۱۲	۹/۸۵	$E 054^{\circ} 56' 20.2''$	$N 36^{\circ} 23' 29.9''$
۱۳	۹/۱۵	$E 054^{\circ} 56' 21.3''$	$N 36^{\circ} 23' 31.2''$
۱۴	۹/۰۵	$E 054^{\circ} 56' 22.6''$	$N 36^{\circ} 23' 32.5''$
۱۵	۱۵/۸۵	$E 054^{\circ} 56' 23.6''$	$N 36^{\circ} 23' 33.7''$
۱۶	۹/۱۵	$E 054^{\circ} 56' 24.2''$	$N 36^{\circ} 23' 35.2''$

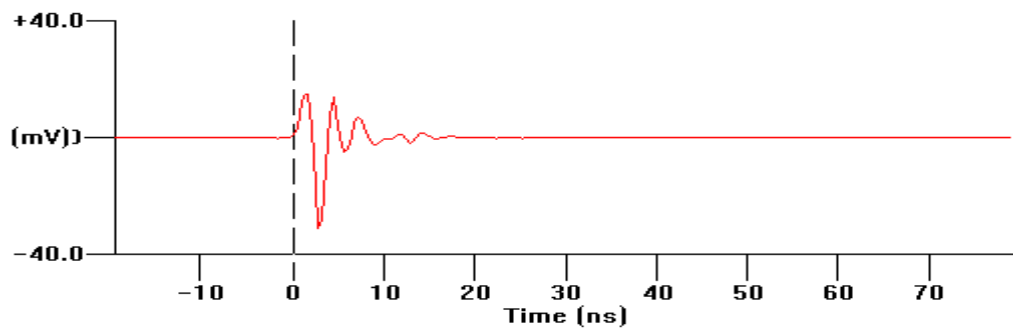
ادامه جدول ۱-۳

شماره پروفیل	طول پروفیل (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱۷	۹/۰۵	$E 054^{\circ} 56' 26''$	$N 36^{\circ} 23' 36.3''$
۱۸	۹/۰۵	$E 054^{\circ} 56' 28.2''$	$N 36^{\circ} 23' 38.4''$
۱۹	۹/۱	$E 054^{\circ} 56' 29.1''$	$N 36^{\circ} 23' 39.5''$
۲۰	۹/۲	$E 054^{\circ} 56' 30.2''$	$N 36^{\circ} 23' 40.9''$
۲۱	۸/۷۵	$E 054^{\circ} 56' 31.6''$	$N 36^{\circ} 23' 41.5''$
۲۲	۹/۰۵	$E 054^{\circ} 56' 32.5''$	$N 36^{\circ} 23' 40.1''$
۲۳	۹/۴	$E 054^{\circ} 56' 32.8''$	$N 36^{\circ} 23' 38.3''$
۲۴	۱۸/۷	$E 054^{\circ} 56' 32.8''$	$N 36^{\circ} 23' 36.6''$
۲۵	۱۸/۶	$E 054^{\circ} 56' 31.2''$	$N 36^{\circ} 23' 35.2''$
۲۶	۱۸/۸	$E 054^{\circ} 56' 30.1''$	$N 36^{\circ} 23' 34.3''$
۲۷	۱۰/۹	$E 054^{\circ} 56' 28.8''$	$N 36^{\circ} 23' 32.4''$
۲۸	۹/۲	$E 054^{\circ} 56' 27.2''$	$N 36^{\circ} 23' 31.3''$
۲۹	۸/۹	$E 054^{\circ} 56' 27.3''$	$N 36^{\circ} 23' 28.2''$
۳۰	۶/۹۵	$E 054^{\circ} 56' 26.1''$	$N 36^{\circ} 23' 32.7''$



شکل ۳-۱: موقعیت تعدادی از پروفیل ها در عکس ماهواره ای

فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دستگاه ثابت و برابر با ۲۷ سانتی متر است. این آنتن‌ها داخل یک محفظه مخصوص قرار گرفته و توسط یک وسیله گاری شکل در طول پروفیل‌ها حرکت داده می‌شوند. از این رو می‌توان گفت که برداشت داده به روش دور افت مشترک انجام می‌شود. این دستگاه مجهز به فاصله سنج^{۶۱} است و می‌توان به کمک آن طول مسیر برداشت شده را اندازه گیری کرد. فاصله بین نقاط برداشت (ردها) در طول هر پروفیل برابر با ۵ سانتی متر است. به عبارت دیگر دستگاه بعد از هر ۵ سانتی متر طی مسیر، یک رد^{۶۲} را از زمین برداشت می‌کند. شکل ۲-۳ یکی از ردهای برداشت شده در طول یکی از پروفیل‌ها را نمایش می‌دهد.

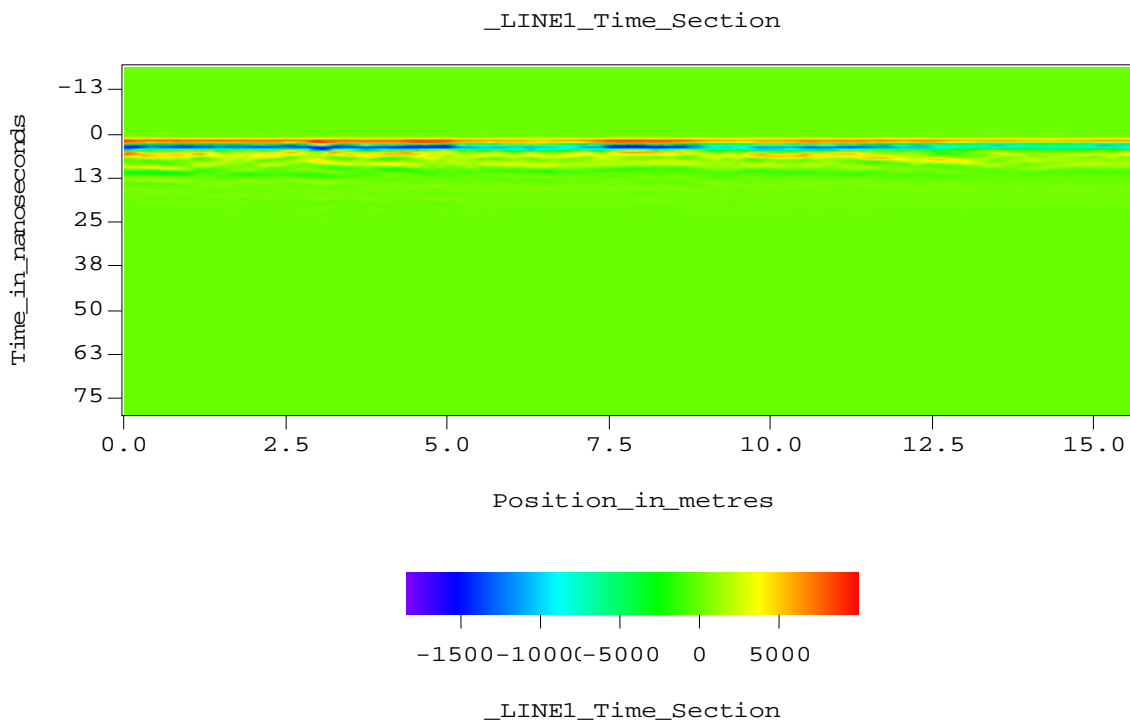


شکل ۲-۳: نمونه رد برداشت شده توسط دستگاه *Noggin Plus*

از کنار هم قرار دادن ردهای برداشت شده در طول یک پروفیل یک مقطع زمانی به دست می‌آید. در یک مقطع زمانی محور عمودی زمان وقوع حوادث بازتابی و محور افقی طول پروفیل برداشت شده را نشان می‌دهند. در شکل ۳-۳ یکی از مقاطع زمانی به دست آمده از نرم افزار *Transform* بدون اعمال هیچ‌گونه پردازشی نمایش داده شده است.

⁶¹ Odometer

⁶² Trace



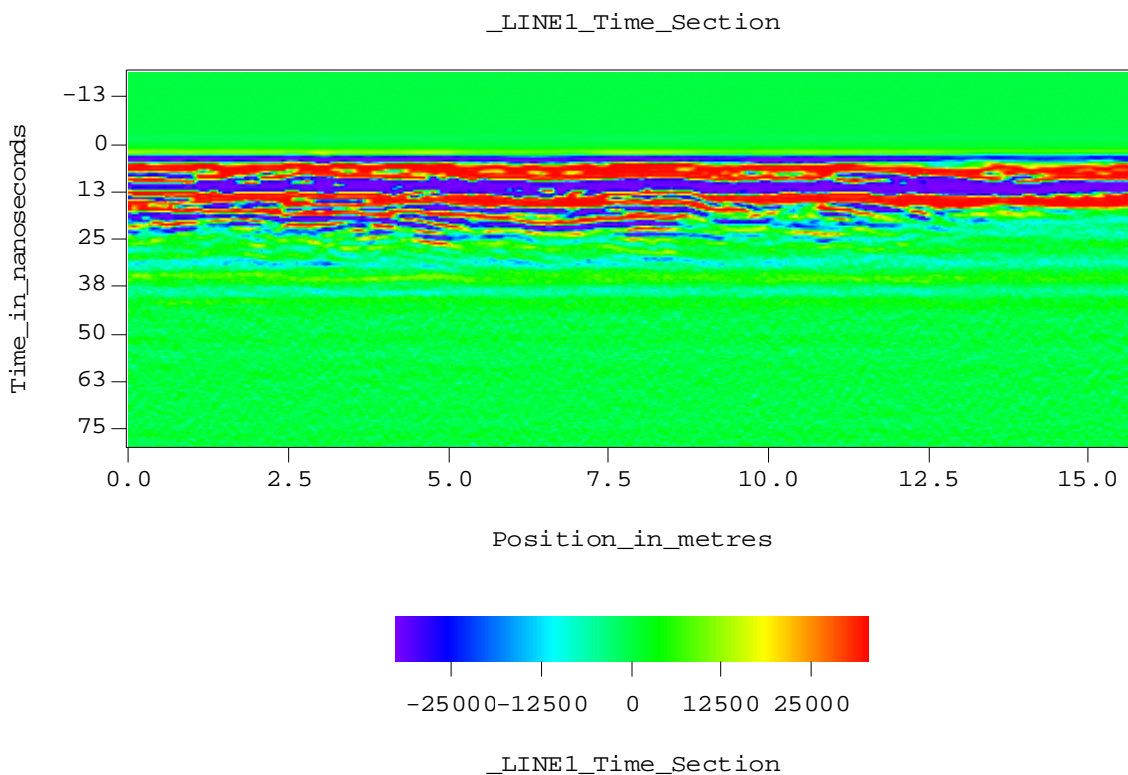
شکل ۳-۳: نمونه مقطع زمانی قبل از پردازش آن.

در مقطع زمانی نشان داده شده در شکل ۳-۳، پیک‌های منفی با رنگ آبی و پیک‌های مثبت با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. در این مقطع، شدت و بزرگی هر پیک نیز با مقیاس‌های رنگی نشان داده شده است. برای مثال هرچه یک پیک منفی بزرگتر باشد رنگ آبی نشان‌دهنده آن نیز پررنگ‌تر خواهد بود، و بالعکس هرچه یک پیک مثبت بزرگتر باشد رنگ قرمز مربوط به آن پررنگ‌تر خواهد بود.

لازم به ذکر است که تمام مقاطع زمانی مربوط به پروفیل‌های زده شده در محوطه دانشگاه، شکلی مشابه با شکل ۳-۳ دارند. یعنی در تمامی آن‌ها به دلیل تضعیف شدید سیگنال‌های رادار، بازتاب‌های زیرسطحی مربوط به اعماق بیشتر، قابل رؤیت نیستند و بدون اعمال پردازش‌های مورد نیاز نمی‌توان هیچ‌گونه اطلاعات زیرسطحی از آن‌ها بدست آورد. لذا در ادامه بحث از ارائه مقاطع زمانی بدون اعمال پردازش، خودداری می‌شود.

۳-۳- پردازش اولیه داده‌ها

بدون اعمال پردازش‌های مورد نیاز، تفسیر داده‌های برداشت شده ممکن نیست. پردازش‌های اولیه اعمال شده بر روی داده‌ها شامل پردازش *DEWOW* جهت حذف فرکانس‌های پایین القایی و پردازش بهره جهت تقویت سیگنال‌های ضعیف است. شکل ۳-۴ همان مقطع زمانی نشان داده شده در شکل ۳-۳ را بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC* نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴: مقطع زمانی بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره.

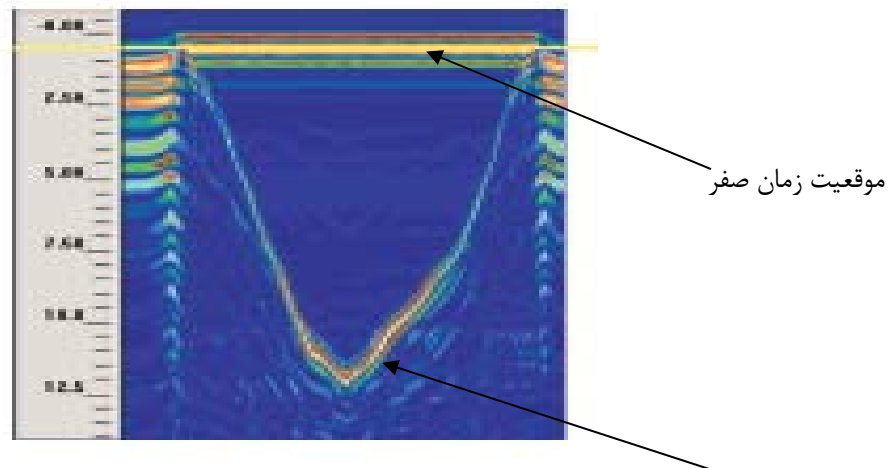
۴-۳- تعیین ضخامت لایه‌های آسفالت و اساس

برای تعیین ضخامت لایه‌های آسفالت و اساس انجام دو مرحله‌ی آزمایش لیفتینگ^{۶۳} و تعیین سرعت موج در زمین ضروری است. در ادامه این مراحل توصیف می‌شوند.

⁶³ Lifting

۳-۴-۱- آزمایش لیفتینگ^{۶۴}

همانطور که قبلاً گفته شد، در آنتن‌های جفت شده به زمین، پالس مستقیم با پالس بازتاب شده از سطح زمین تداخل می‌کند. بنابراین محل دقیق بازتابش از سطح زمین در مقاطع زمانی مشخص نیست [۱۹]. موقعیت صحیح زمان صفر موج رادار لزوماً یک مقدار ثابت نیست. این موقعیت به نوع آنتن، ارتفاع آنتن در بالای سطح زمین و خصوصیات الکتریکی ماده‌ی زیر سطحی بستگی دارد [۱۹]. برای مشخص شدن زمان و محل وقوع پالس بازتاب شده از سطح، از آزمایش لیفتینگ استفاده می‌شود [۳ و ۱۹]. نحوه انجام این آزمایش بدین صورت است که آنتن روی یک صفحه فلزی بزرگ قرار می‌گیرد. سپس به آرامی از سطح صفحه فلزی جدا شده و تا ارتفاع مشخصی بالا برده می‌شود و بعد دوباره به آرامی روی صفحه فلزی قرار می‌گیرد. این عمل باعث می‌شود که با افزایش فاصله آنتن از سطح زمین، یک فاصله زمانی بین پالس مستقیم (کوپلینگ) و پالس بازتاب شده از سطح ایجاد شود و کاربر قادر به تشخیص موقعیت بازتابش سطحی باشد [۱۹]. نمونه‌ای از انجام این تست با استفاده از آنتن ۱/۵ گیگاهرتز در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است.

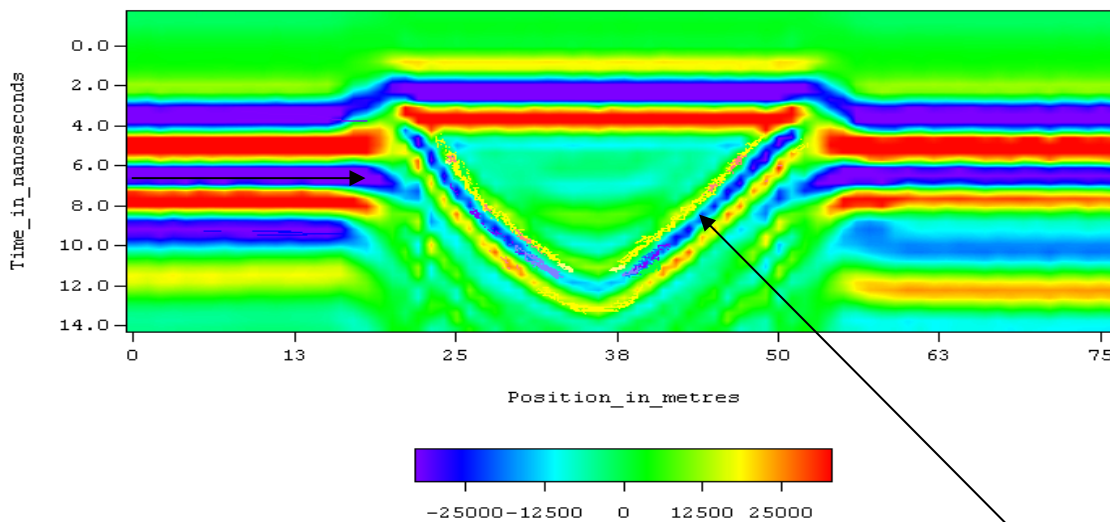


شکل ۳-۵: نمونه‌ای از آزمایش لیفتینگ [۲۰]. بازتابش از صفحه فلزی

در این آزمایش اولین پیک زرد رنگ به عنوان زمان صفر (موقعیت انعکاس سطحی) در نظر گرفته شده

⁶⁴ Lifting

است. نظیر همین آزمایش با استفاده از آنتن *Noggin Plus 250 MHz* انجام شده است که نتیجه آن در شکل ۳-۶ ملاحظه می‌شود.



بازتابش از صفحه فلزی

شکل ۳ - ۶: آزمایش لیفتینگ بر روی آنتن *Noggin Plus 250MHz*

همانطور که در شکل نمایش داده شده است، پالس بازتاب شده از سطح فلزی، یک پالس منفی و به شکل V است، در حالی که پالس جفت شدگی به صورت افقی باقی مانده است. در این حالت با امتداد پالس بازتاب سطحی می‌توان زمان وقوع آن را در روی محور زمان مشخص کرد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، امتداد پالس بازتاب شده از صفحه‌ی فلزی با یک محور سیاه رنگ، زمان وقوع پالس بازتاب سطحی را برابر با $3/5$ نانوثانیه نشان می‌دهد. این بدان معنی است که سطح آسفالت (زمان صفر) در مقطع زمانی در زمان $3/5$ نانوثانیه و در محل اولین پیک منفی (آبی رنگ) قرار دارد.

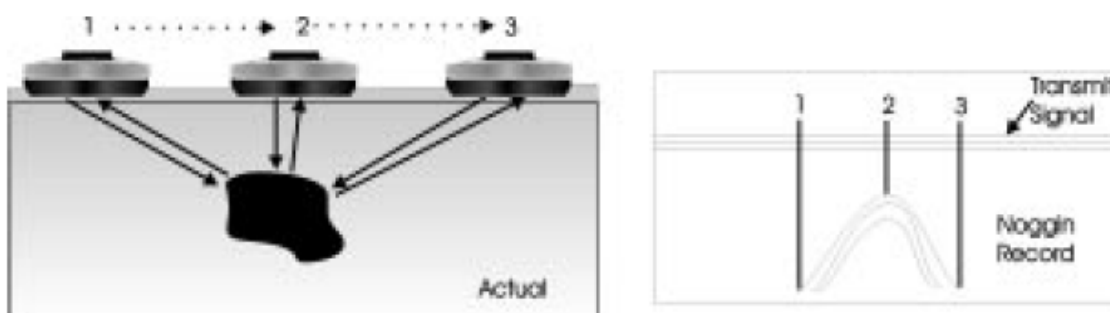
۳-۴-۲- تعیین سرعت موج در زمین

برای تعیین ضخامت لایه‌های روسازی، باید مقاطع زمانی به مقاطع عمقی تبدیل شوند. در مقاطع عمقی محور افقی طول پروفیل و محور عمودی عمق وقوع حوادث بازتابی را نشان می‌دهند.

قبل از تبدیل مقاطع زمانی به مقاطع عمقی، ابتدا باید سرعت حرکت پالس‌های *GPR* در زمین تعیین شود. سپس نرم افزار *Win-Ekko pro* طبق رابطه زیر مقاطع زمانی را به مقاطع عمقی تبدیل می‌کند.

$$D = \frac{VT}{2} \quad (۳-۱)$$

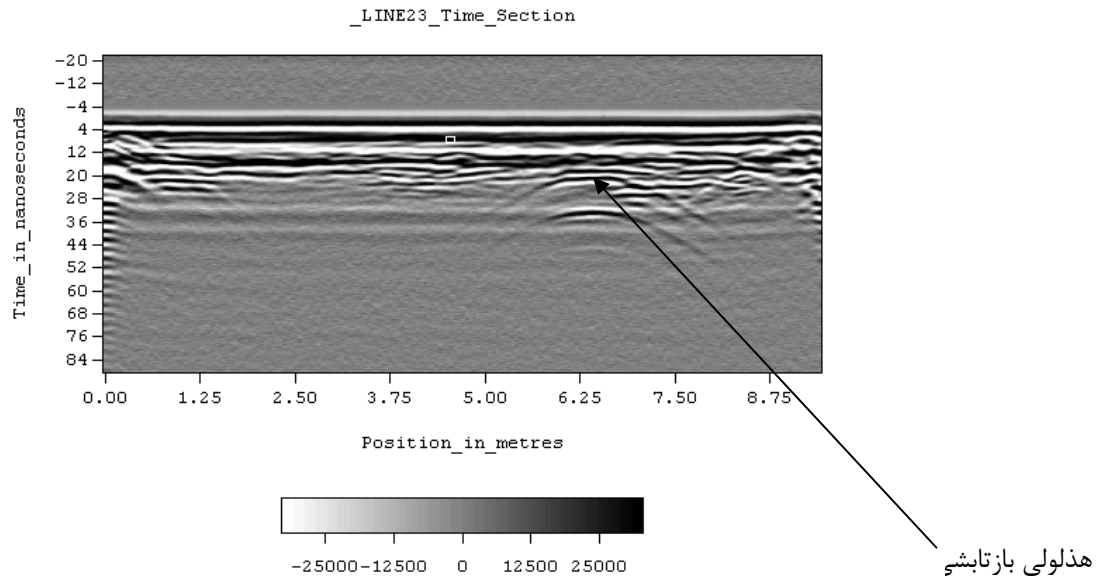
که در رابطه بالا، T زمان رفت و برگشت پالس، V سرعت حرکت پالس در زمین و D عمق وقوع حادثه است. سرعت متوسط حرکت پالس در زمین را می‌توان به کمک روش انطباق هذلولی به دست آورد [۲۰]. اگر به هنگام پروفیل زنی، دستگاه از روی یک جسم بازتاب‌کننده قوی نظیر یک لوله فلزی عبور کند، بازتاب‌های حاصل از این جسم بر روی مقاطع زمانی رادار به شکل هذلولی خواهد بود. شکل ۳-۷ نحوه به وجود آمدن هذلولی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷: نحوه ی ایجاد هذلولی بازتابی [۲۰].

برای تعیین سرعت پالس در زمین از گزینه *CALIB* که به هنگام پروفیل‌زنی در صفحه *DVL* دستگاه ظاهر می‌شود استفاده می‌کنیم. با انتخاب این گزینه یک هذلولی بر روی *DVL* ظاهر می‌شود. با جابجایی این هذلولی و انطباق کامل آن با هذلولی ناشی از جسم بازتاب‌کننده، سرعت متوسط پالس توسط دستگاه محاسبه می‌شود. در شکل ۳-۸ یکی از هذلولی‌های به دست آمده از پروفیل زنی در

محوطه داخلی دانشگاه نمایش داده شده است که احتمالاً ناشی از وجود لوله فلزی در آن محل می- باشد.



شکل ۳-۸: نمونه‌ای از هدلولی‌های به‌دست آمده در محوطه‌ی دانشگاه.

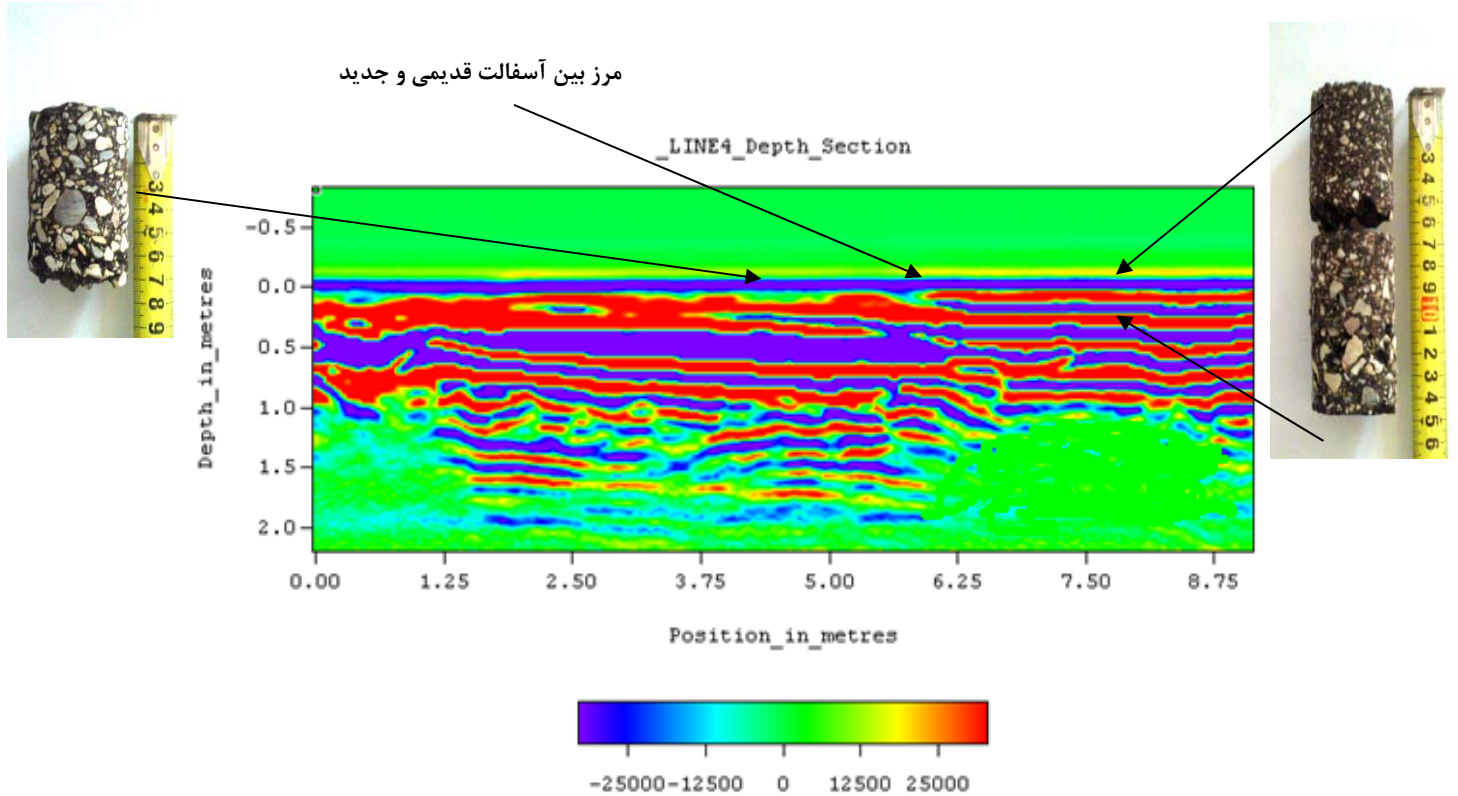
نتایج چند مورد استفاده از این روش در محوطه داخلی دانشگاه نشان داد که سرعت متوسط پالس بین ۰/۱ متر بر نانوثانیه تا ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه تغییر می‌کند و سرعت متوسط ۰/۱۱ متر بر نانوثانیه به عنوان سرعت پالس در تمامی مقاطع عمقی در نظر گرفته شد.

۳-۴-۳- بررسی انطباق ضخامت آسفالت و اساس به کمک مقاطع عمقی GPR

به منظور بررسی ضخامت لایه‌ی آسفالتی در محل‌های پروفیل‌های برداشت شده، در طول برخی از این پروفیل‌ها مغزه‌گیری انجام گرفت. همچنین برای بررسی خاک زیر سطحی آسفالت، از دو حلقه چاهک در محل دو پروفیل مختلف استفاده شد. در ادامه‌ی این بحث به بررسی نحوه‌ی انطباق نتایج حاصل از مغزه‌گیری و حفاری با مقاطع عمقی GPR پرداخته می‌شود.

الف- مقطع عمقی شماره ۴

در شکل ۳-۹ مقطع عمقی به دست آمده از پروفیل شماره ۴ به همراه مغزه‌های گرفته شده از این پروفیل نمایش داده شده است.



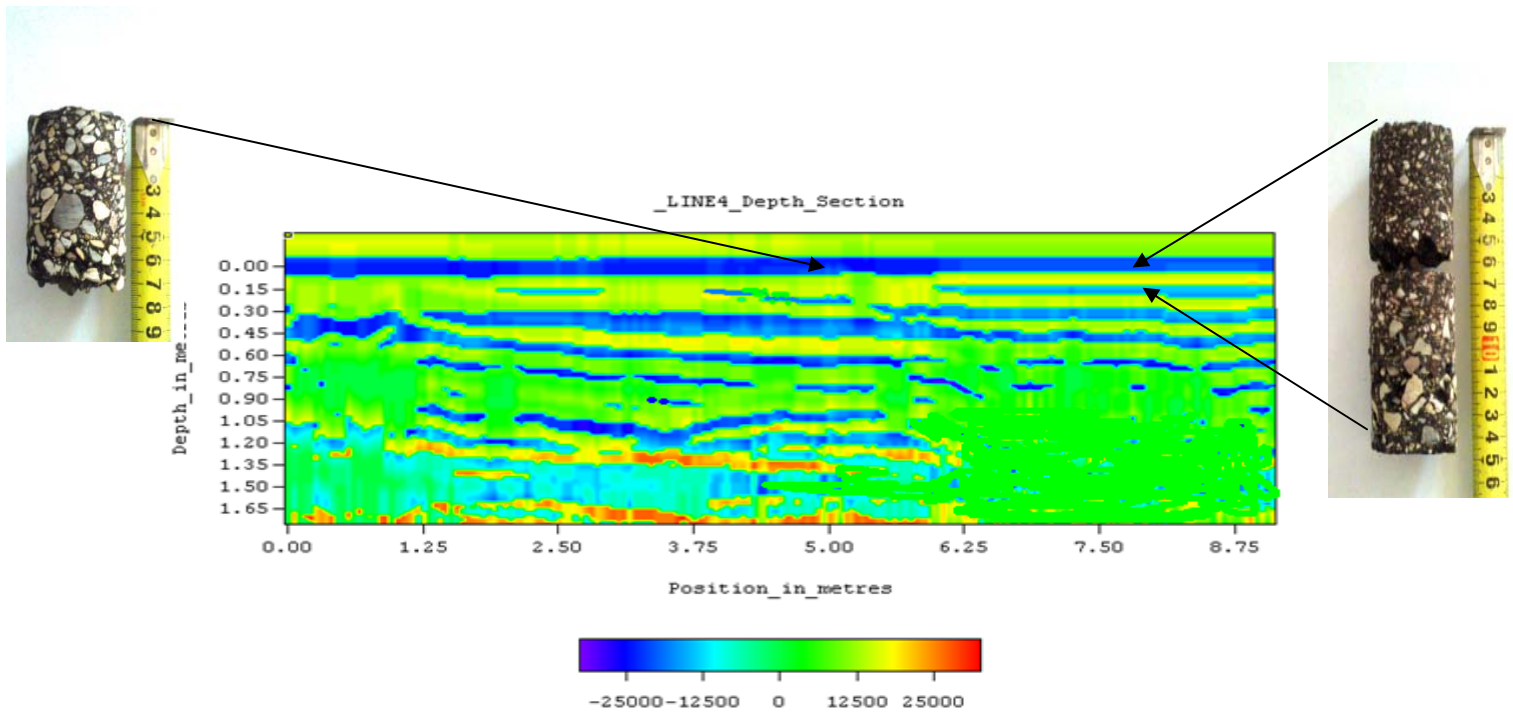
شکل ۳-۹: انطباق ضخامت مغزه‌های آسفالتی با مقطع عمقی شماره ۴.

همان‌طور که در شکل ۳-۹ ملاحظه می‌شود، ضخامت مغزه آسفالتی گرفته شده از سمت راست این پروفیل برابر با $14/5$ سانتی‌متر است. مرز بالایی مغزه، مطابق با آزمایش لیفتینگ بر اولین پیک منفی و مرز پایین آن نیز بر پیک منفی که در عمق 15 سانتی‌متری اتفاق افتاده است، منطبق می‌شود. لازم به ذکر است که در نیمه سمت راست مقطع، آسفالت بازسازی شده و جدیدتر از نیمه سمت چپ است و این باعث می‌شود که مرز بین لایه‌ها مشخص‌تر بوده و بازتابش‌های بارزتری از مرز بین لایه‌ها اتفاق بیفتد و در نتیجه تشخیص آن‌ها با *GPR* آسان‌تر باشد. در نیمه سمت چپ مقطع ضخامت مغزه 7 سانتی‌متر است اما در مقطع عمقی این ضخامت قابل تشخیص نیست. دلیل این امر

آن است که قدرت تفکیک عمودی آنتن ۲۵۰ مگاهرتز در حدی نیست که بتوان به کمک آن ضخامت ۷ سانتی‌متری از آسفالت را تعیین کرد. در توضیح این مطلب باید گفت قدرت تفکیک عمودی طبق رابطه (۲-۳۰) برابر است با:

$$\delta r \geq \frac{WV}{4}$$

با توجه به اینکه سرعت پالس در زمین (v) برابر ۰/۱۱ متر بر نانو ثانیه و پهنای پالس (W) برای آنتن ۲۵۰ مگاهرتز برابر با ۴ نانو ثانیه است، قدرت تفکیک عمودی در حالت خوش بینانه برابر با ۱۱ سانتی-متر خواهد بود. از طرف دیگر همان‌طور که در مقطع عمقی نشان داده شده در شکل ۳-۹ ملاحظه می‌شود، همپوشانی حوادث بازتابی با یکدیگر تشخیص محل دقیق مرزهای زیر سطحی را نیز با مشکل مواجه می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان از پردازش واهمامیخت استفاده کرد. چراکه با اعمال این پردازش، پالس‌های کشیده شده‌ی رادار فشرده شده و به اسپایک تبدیل می‌شوند و بدنبال آن مرزهای زیر سطحی با قدرت تفکیک بهتری نمایش داده می‌شوند. نحوه‌ی اعمال این پردازش در پیوست ب توضیح داده شده است. شکل ۳-۱۰ مقطع عمقی شکل ۳-۹ را بعد از اعمال پردازش واهمامیخت نمایش می‌دهد.



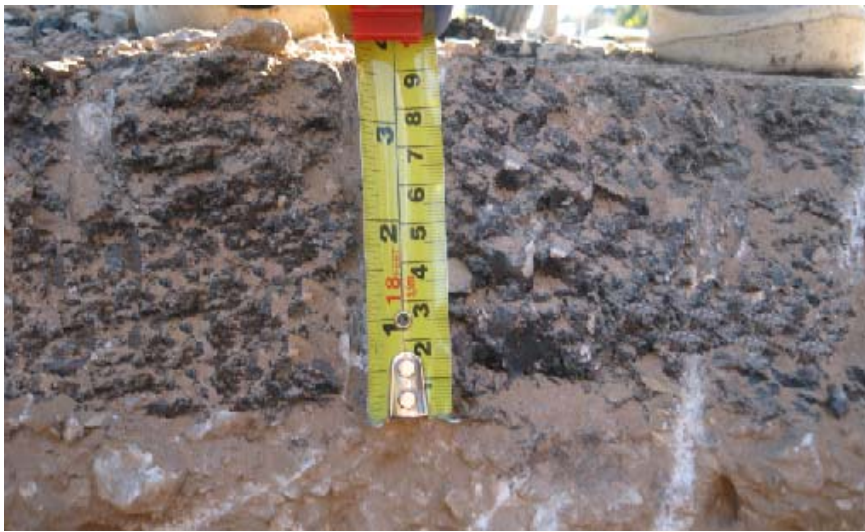
شکل ۳-۱۰: انطباق ضخامت مغزه های آسفالتی با مقطع عمقی شماره ۴ بعد از اعمال واهمامیخت.

همان طور که در شکل بالا ملاحظه می شود، ضخامت $14/5$ سانتی متری لایه ی آسفالتی در سمت راست مقطع به شکل بهتری نمایش داده می شود. اما مغزه ی 7 سانتی متری در این مقطع نیز قابل تشخیص نیست.

نتایج حاصل از مغزه گیری از محل پروفیل های مختلف در محوطه ی داخل دانشگاه نشان داد که ضخامت آسفالت بین 3 تا 8 سانتی متر متغیر است که این ضخامت ها کمتر از قدرت تفکیک عمودی آنتن 250 مگاهرتز است. بنابراین به جز مورد ذکر شده در مقطع شماره 4 امکان تعیین ضخامت آسفالت با استفاده از این آنتن در سایر پروفیل هایی که از آنها مغزه گیری شده است، وجود ندارد.

ب- مقطع عمقی شماره ۶

همان طور که قبلاً گفته شد، به منظور بررسی ضخامت آسفالت و خاک زیر سطحی آن از دو حلقه چاهک استفاده شد. یکی از این چاهک ها در فاصله $4/5$ متری از ابتدای پروفیل شماره 6 حفر شد. این چاهک نشان داد که ضخامت لایه آسفالت در محل این پروفیل 9 سانتی متر است و در زیر آن حدود 40 سانتی متر خاک دستی ریخته شده است. شکل های $3-11$ تا $3-12$ ضخامت لایه آسفالت و خاک دستی را به همراه مقطع عمقی رادار نمایش می دهند.

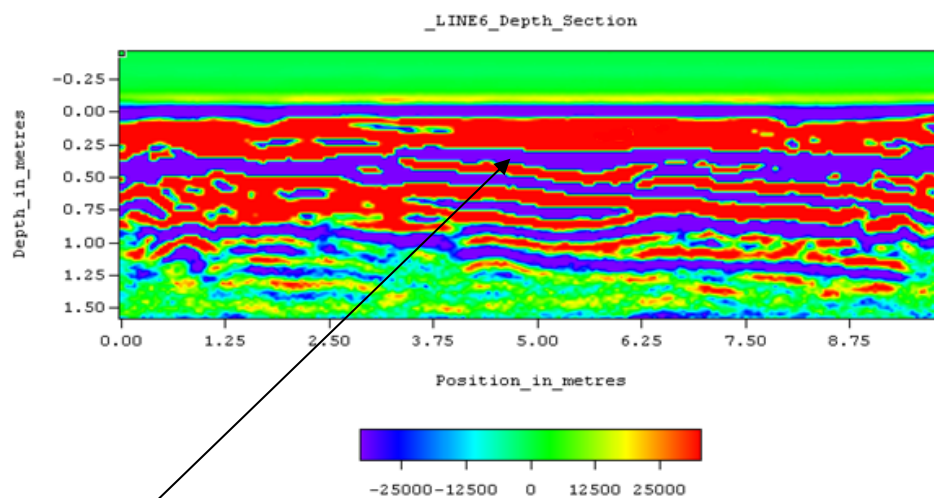


شکل ۳- ۱۱: ضخامت ۹ سانتی متری آسفالت در محل پروفیل شماره ۶.



شکل ۳- ۱۲: مرز بین خاک دستی و بکر در محل پروفیل شماره ۶

مرز بین خاک دستی و بکر



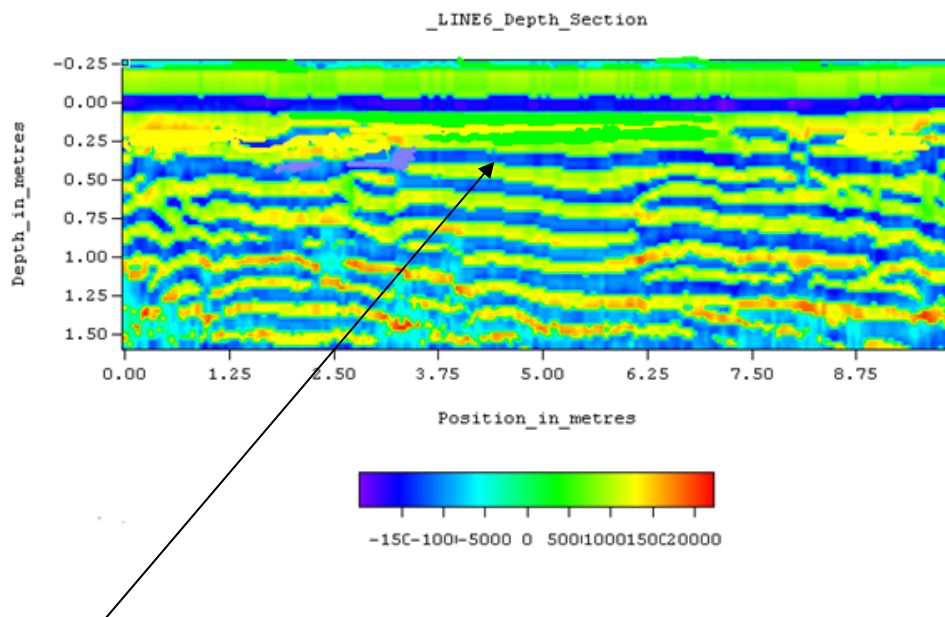
شکل ۳-۱۳: مقطع عمقی شماره ۶ بعد از اعمال پردازش‌های DEWOW و بهره‌SEC.

مرز بین خاک دستی

و بکر در محل

چاهک

همان‌طور که در مقطع عمقی شکل ۳-۱۳ مشخص است، ضخامت ۹ سانتی‌متری آسفالت در مقطع عمقی رادار قابل تشخیص نیست. اما می‌توان پیک منفی (آبی رنگ) واقع شده در عمق ۴۰ سانتی متری را بر مرز بین خاک دستی و بکر منطبق کرد. در شکل ۳-۱۴ همین مقطع بعد از اعمال پردازش واهمامیخت نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۴: مقطع عمقی شماره ۶ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت. مرز بین خاک دستی و

بکر در محل حفر

چاهک

در مقطع عمقی شکل ۳-۱۴، مرز بین خاک دستی و بکر بهتر از مقطع ۳-۱۳ نمایش داده شده است.

ج- مقطع عمقی شماره ۳۰

چاهک دوم برای بررسی آسفالت و خاک زیر سطحی آن، در قسمت انتهایی پروفیل شماره ۳۰ حفر شد. این چاهک نشان داد که ضخامت لایه‌ی آسفالتی در محل این پروفیل ۵ سانتی‌متر است و در زیر آن حدود ۵۰ سانتی‌متر خاک دستی ریخته شده است. در شکل‌های ۳-۱۵، ۳-۱۶ و ۳-۱۷ تصویر لایه‌ی آسفالت و خاک دستی نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۵: ضخامت ۵ سانتی متری از لایه‌ی آسفالتی در محل پروفیل شماره‌ی ۳۰.



شکل ۳-۱۶: چاهک حفر شده بر روی پروفیل شماره ۳۰.

مرز بین خاک دستی و بکر

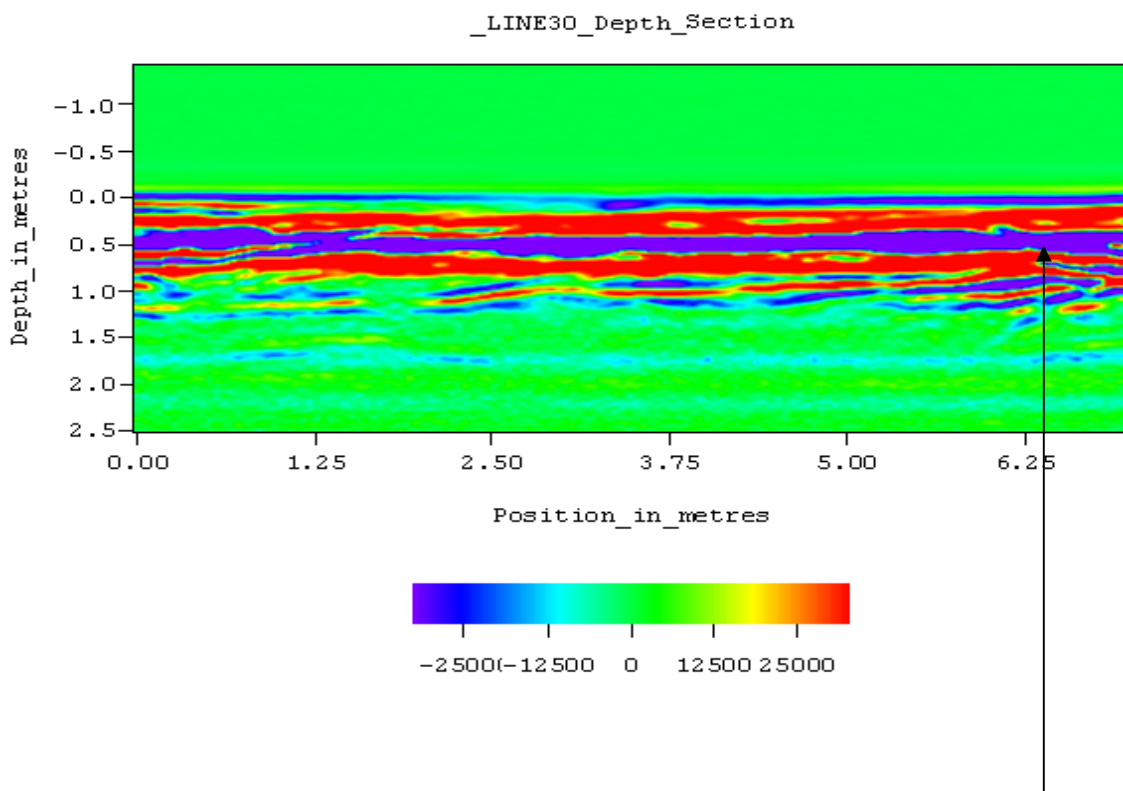


شکل ۳-۱۷: مرز بین خاک دستی و خاک بکر در چاهک حفر شده در پروفیل ۳۰ از نمای نزدیک.

مرز بین خاک

دستی و بکر

در شکل ۳-۱۸ مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، تعیین ضخامت لایه‌ی آسفالتی در مقطع عمقی ممکن نیست، اما در عمق ۵۰ سانتی‌متری از این مقطع یک پیک منفی (آبی رنگ) وجود دارد که می‌توان آن را بر مرز بین خاک دستی و خاک بکر منطبق کرد.



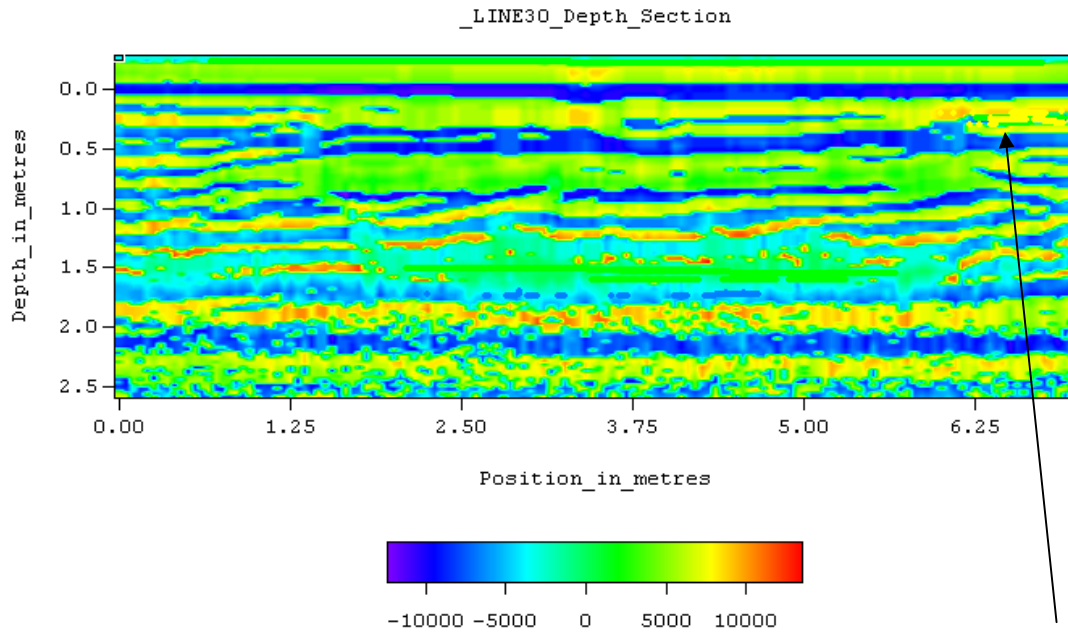
شکل ۳-۱۸: مقطع عمقی شماره‌ی ۳۰ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره‌ی *SEC*.

بازتاب منفی از مرز بین

خاک دستی و بکر

در محل حفر چاهک

شکل ۳-۱۹ همین مقطع عمقی را بعد از اعمال پردازش واهمامیخت نمایش می‌دهد.

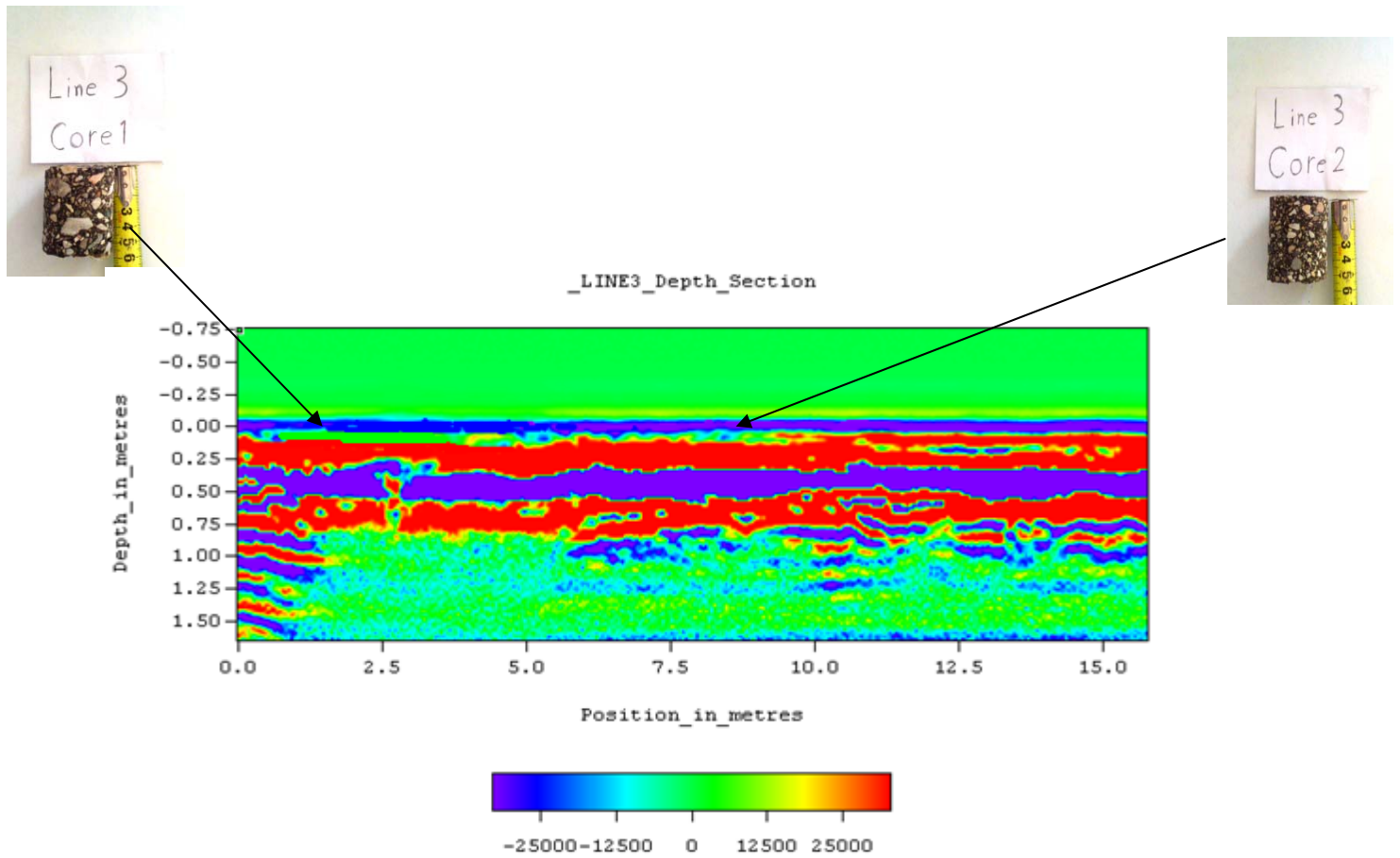


شکل ۳-۱۹: مقطع عمقی شماره ۳۰ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت. مرز بین خاک دستی و بکر

همان طور که در این مقطع عمقی نیز ملاحظه می شود تعیین ضخامت لایه ی آسفالتی ممکن نیست. اما بازتابش از مرز بین خاک دستی و بکر در عمق $0/5$ متری به خوبی قابل تشخیص است.

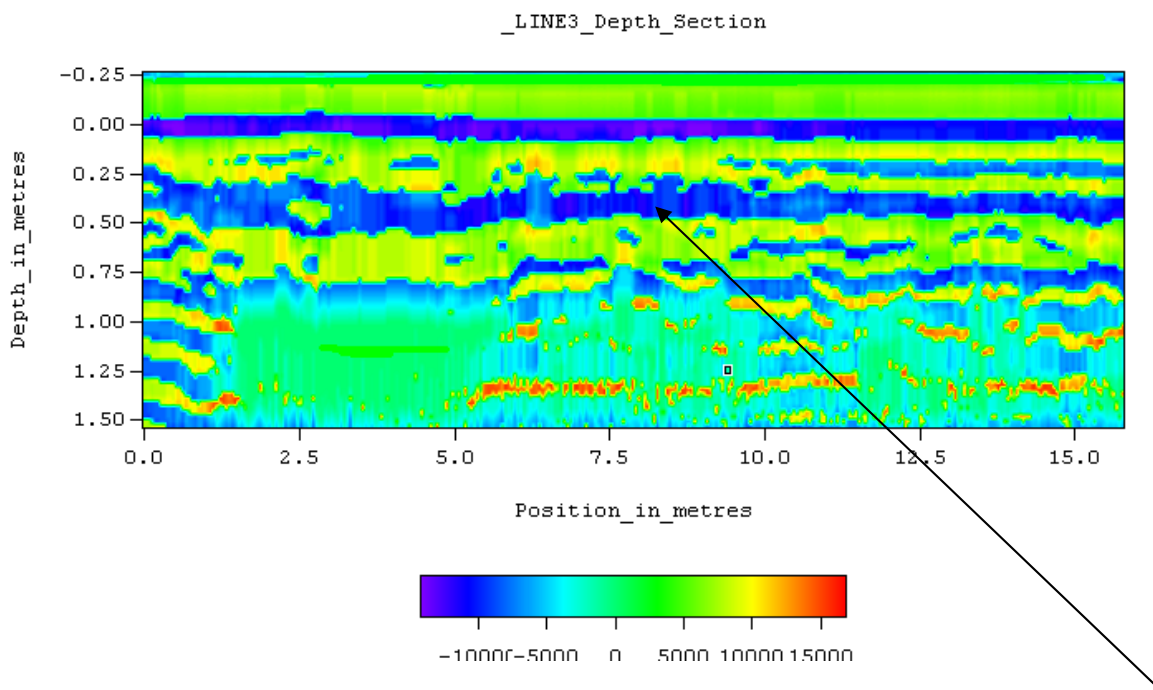
د- مقطع عمقی شماره ۳

در شکل ۳-۲۰ مقطع عمقی پروفیل شماره ۳ به نمایش درآمده است. ضخامت مغزه ها در سمت چپ و راست این مقطع به ترتیب برابر با $5/5$ و 5 سانتی متر است. که هیچ کدام قابل تشخیص نیستند. اما در این مقطع پیک منفی که در عمق حدود 30 تا 40 سانتی متر واقع شده، احتمالاً مربوط به مرز بین خاک دستی و خاک بکر است.



شکل ۳-۲۰: مقطع عمقی شماره ۳ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

مقطع عمقی این پروفیل بعد از اعمال پردازش واهمامیخت در شکل ۳-۲۱ نمایش داده شده است

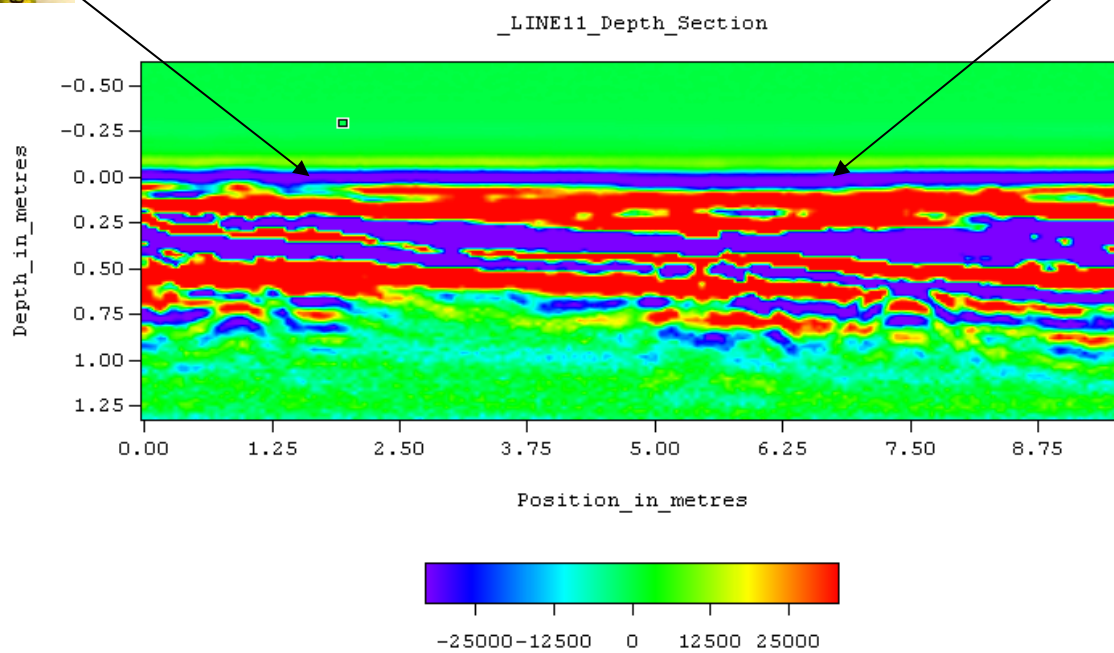
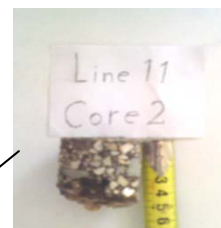


مرز بین خاک
دستی و بکر
شکل ۳-۲۱: مقطع عمقی شماره ۳ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت.

در این مقطع نیز مرز احتمالی بین خاک دستی و بکر در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی متر به شکل بهتری نمایش داده شده است.

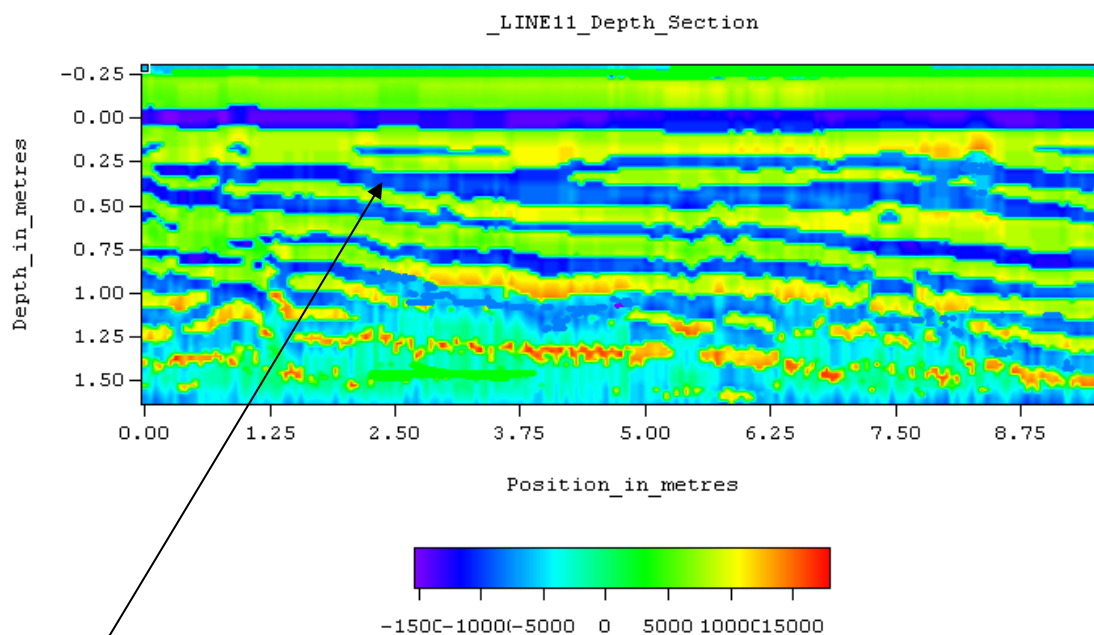
ر- مقطع عمقی شماره ۱۱

مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۱ در شکل ۳-۲۲ نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، ضخامت مغزه های آسفالتی در سمت چپ و راست مقطع به ترتیب برابر با ۷/۵ و ۴/۵ سانتی متر است که هیچ کدام در مقطع قابل تشخیص نیستند. ضخامت خاک دستی زیر آن را می توان از حدود ۳۰ سانتی متر در سمت چپ مقطع تا ۵۰ سانتی متر در سمت چپ آن تخمین زد.



شکل ۳-۲۲: مقطع عمقی شماره ۱۱ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

اثر اعمال پردازش واهمامیخت بر این مقطع در شکل ۳-۲۳ مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۲۲): مقطع عمقی شماره ۱۱ بعد از اعمال پردازش واپیچش مرز بین خاک

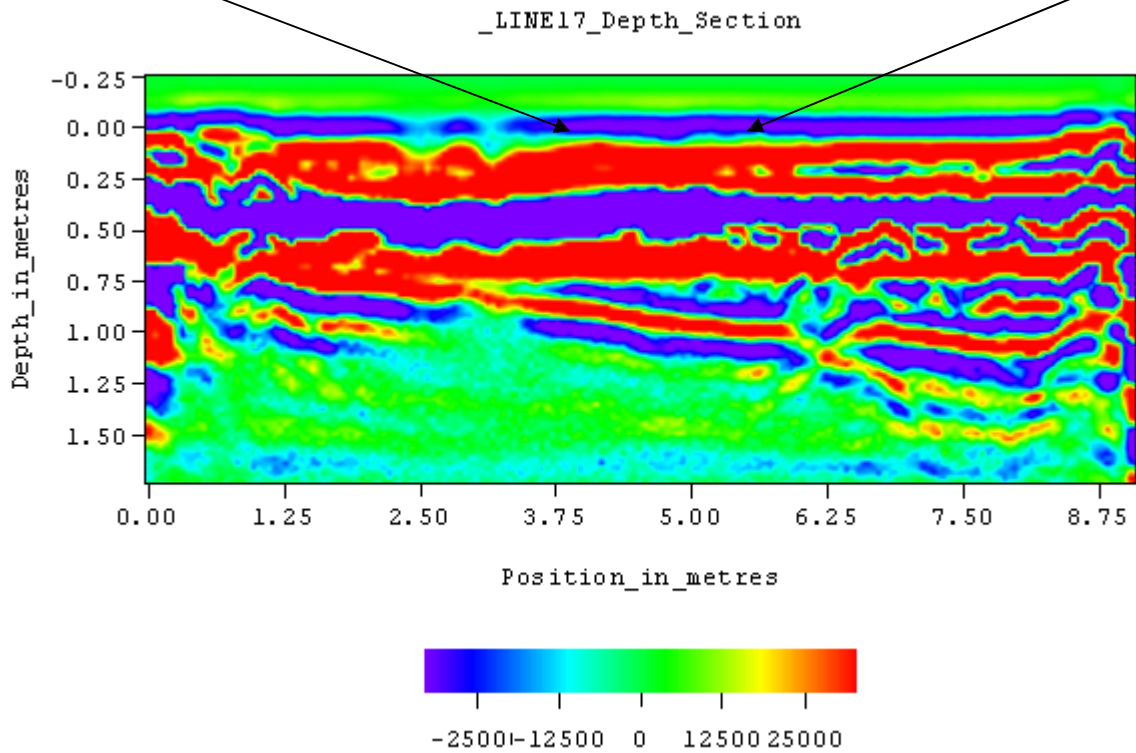
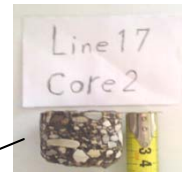
مرز بین خاک

دستی و بکر

این مقطع نیز ضخامت خاک دستی را در سمت چپ مقطع حدود ۳۰ سانتی متر و در سمت راست آن حدود ۵۰ سانتی متر نشان می دهد.

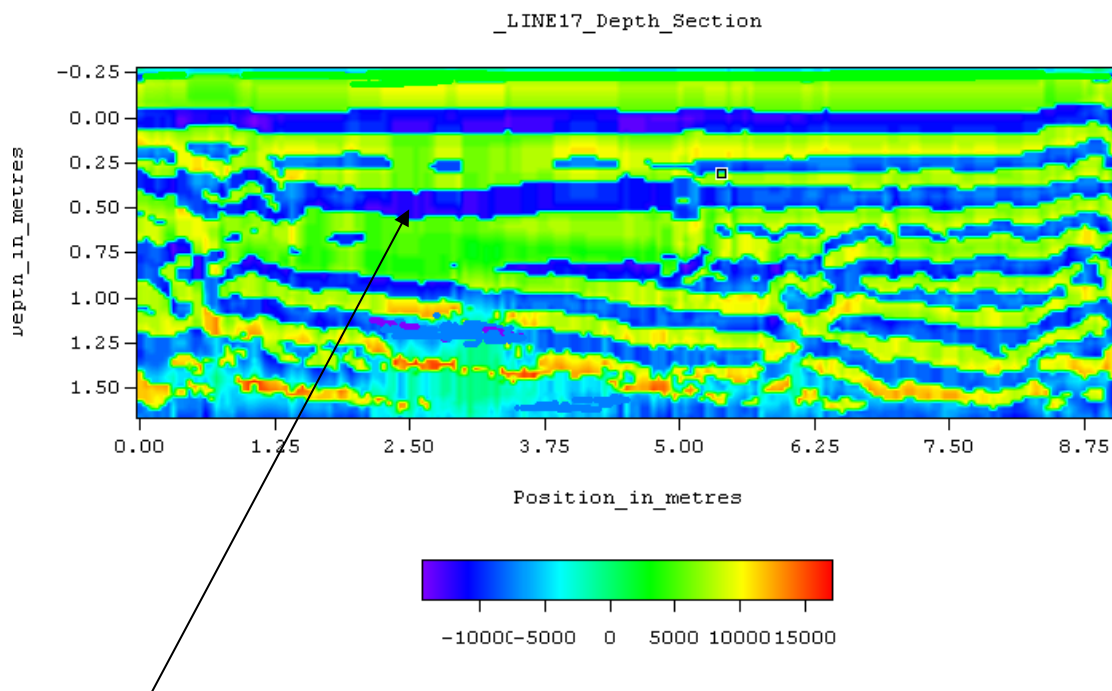
ز- مقطع عمقی شماره ۱۷

در شکل ۳-۲۴ مقطع عمقی شماره ۱۷ نمایش داده شده است. ضخامت مغزه های آسفالتی در سمت چپ و راست مقطع برابر $3/5$ سانتی متر است که در مقطع قابل تشخیص نیست. ضخامت خاک دستی در این مقطع در حدود ۴۰ سانتی متر تخمین زده می شود.



شکل ۳-۲۴: مقطع عمقی شماره ۱۷ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

در شکل ۳-۲۵ این مقطع عمقی بعد از اعمال پردازش واهمامیخت نمایش داده شده است.



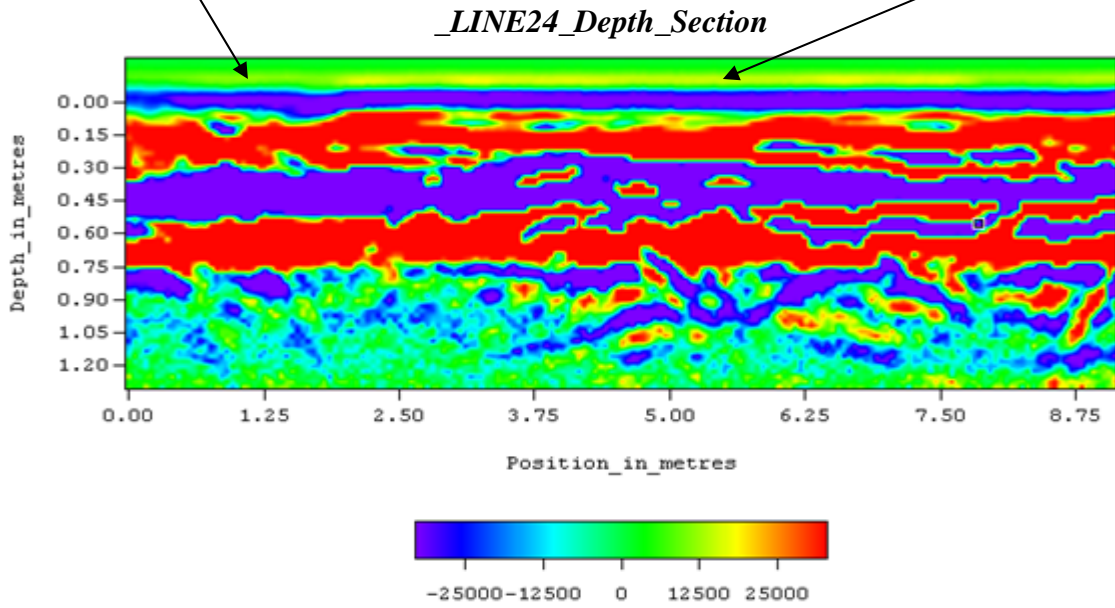
شکل ۳-۲۵: مقطع عمقی شماره ۱۷ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت.

مرز بین خاک دستی و بکر

در شکل ۳-۲۵ نیز بازتابش قوی در عمق ۴۰ سانتی متری مرز احتمالی خاک دستی و بکر را نمایش می دهد.

۵- مقطع عمقی شماره ۲۴

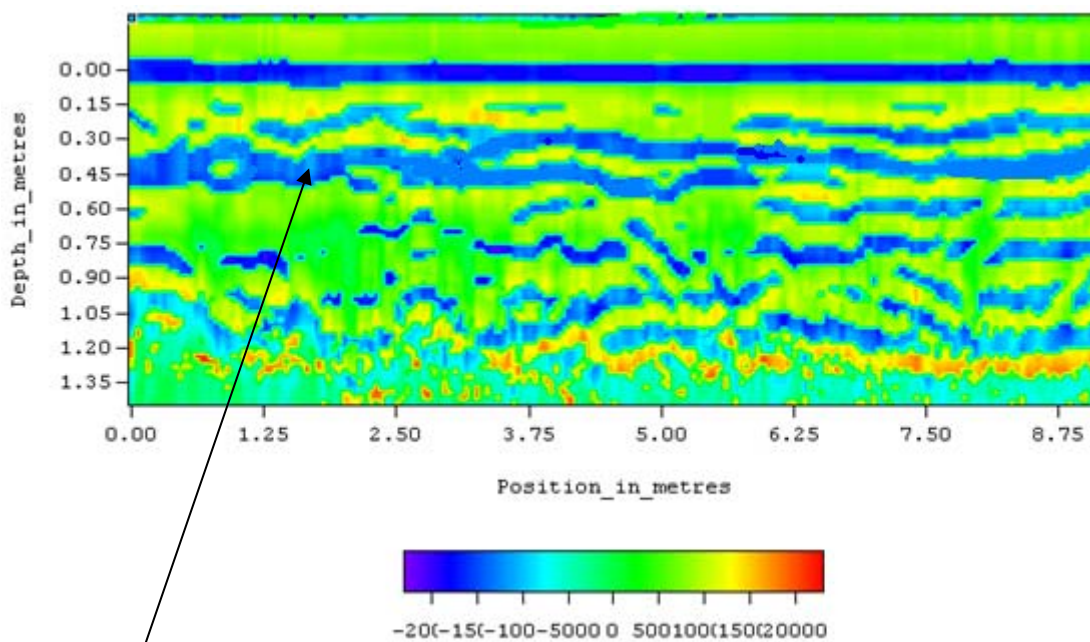
مقطع عمقی شماره ۲۴ در شکل ۳-۲۶ نمایش داده شده است. در اینجا نیز ضخامت مغزه ها در سمت چپ و راست این مقطع برابر $۷/۵$ سانتی متر است که هیچ کدام قابل تشخیص نیستند. ضخامت خاک دستی حدود ۴۵ سانتی متر تخمین زده می شود.



شکل ۳-۲۶: مقطع عمقی شماره ۲۴ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

شکل ۳-۲۷ همین مقطع را بعد از اعمال پردازش واهمامیخت نمایش می‌دهد.

LINE24_Depth_Section



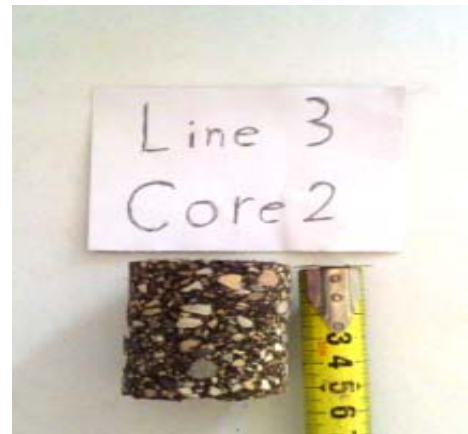
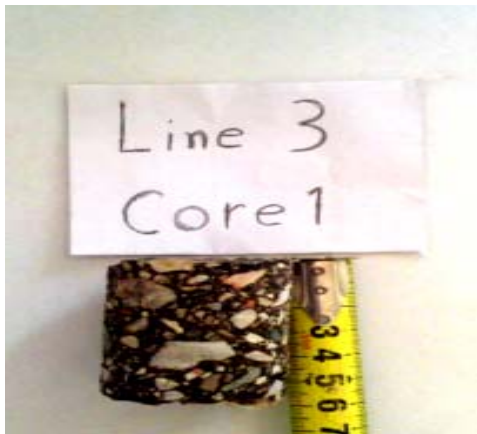
شکل ۳-۲۷: مقطع عمقی شماره‌ی ۲۴ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت.

مرز بین خاک

دستی و بکر

در شکل بالا نیز مرز احتمالی بین خاک دستی و بکر بر بازتابش‌های واقع در عمق تقریبی ۴۵ سانتی متری منطبق می شود.

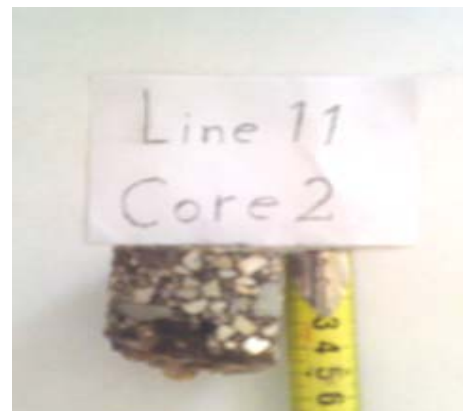
در شکل‌های زیر، تصویر مغزه‌های آسفالتی به همراه ضخامت و محل مغزه‌گیری آن‌ها نشان داده شده است.



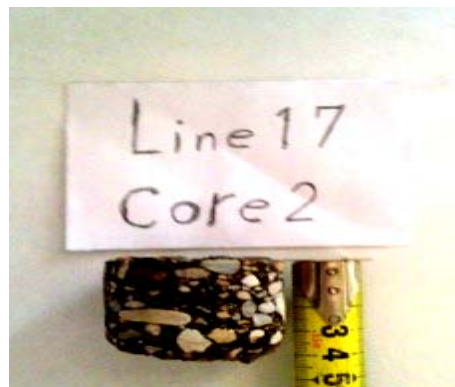
شکل ۳-۲۸: مغزه‌های گرفته شده از پروفیل شماره ۳.



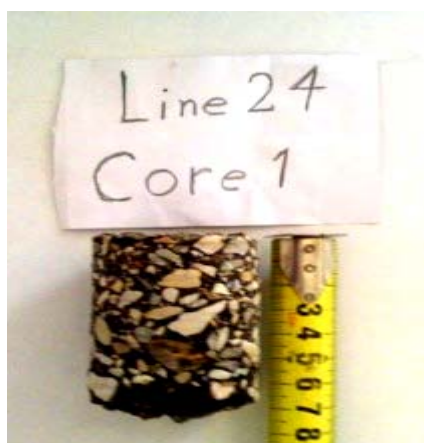
شکل ۳-۲۹: مغزه‌های گرفته شده از پروفیل شماره ۴.



شکل ۳-۳۰: مغزه‌های گرفته شده از پروفیل شماره ۱۱.



شکل ۳-۳۱: مغزه‌های گرفته شده از پروفیل شماره ۱۷.



شکل ۳-۳۲: مغزه‌های گرفته شده از پروفیل شماره ۲۴.

نتایج بررسی ضخامت لایه‌ی آسفالت و اساس در تعداد دیگری از پروفیل‌هایی که از آنها مغزه‌گیری نشده است، در پیوست الف ارائه شده است.

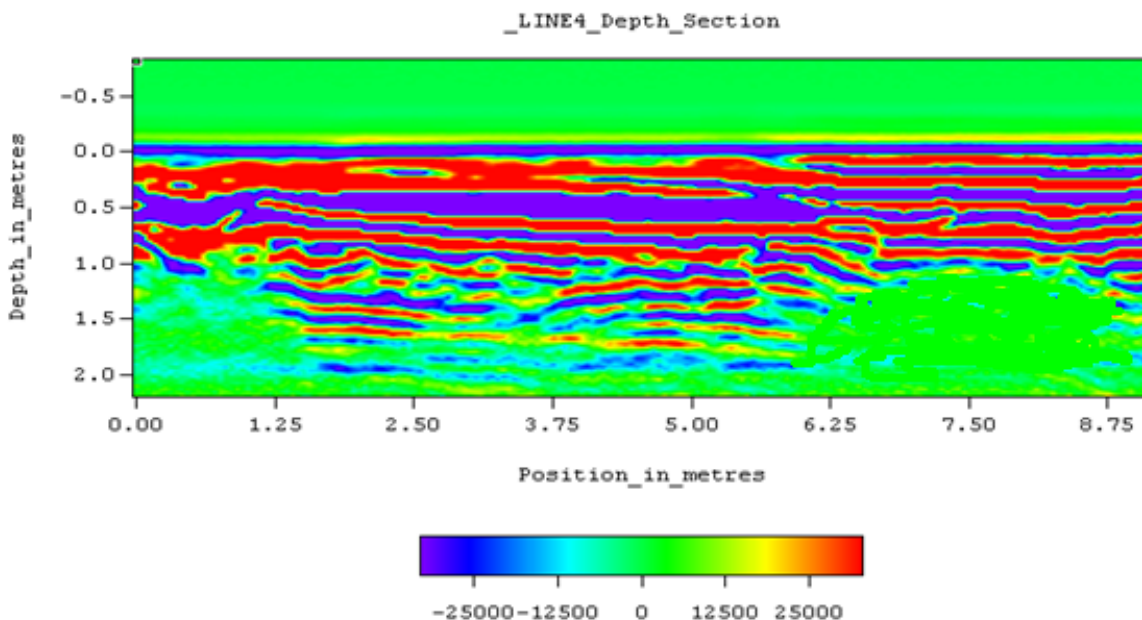
۳-۵- تعیین خصوصیات کیفی آسفالت به کمک GPR

همان‌طور که در فصل ۲ نیز اشاره شد، برای تعیین خصوصیات کیفی آسفالت از لحاظ میزان حفرات هوا یا چگالی، لازم است که ثابت دی‌الکتریک آسفالت از روی دامنه‌ی پالس بازتاب شده از سطح آن تعیین شود. اما چنان‌که در فصل دوم دیدیم، برای انجام این کار لازم است که آنتن مورد استفاده از نوع جفت شده به هوا باشد. در آنتن‌های زمینی، همپوشانی موج مستقیم (کوپلینگ) و موج بازتابش سطحی، مانع انجام این کار می‌شود.

۳-۶- تعیین خصوصیات کیفی خاک زیر سطحی

تعیین خصوصیات کیفی خاک زیر سطحی مانند محتوای رطوبت آن با استفاده از روش بازتابش سطحی در آنتن های جفت شده به زمین ممکن نیست. اما می توان از روی تضعیف سیگنال های *GPR* و میزان عمق نفوذ آنها، اطلاعاتی در مورد خاک زیر سطحی بدست آورد. در ادامه به بررسی دو مورد از پروفیل های برداشت شده در داخل دانشگاه پرداخته می شود.

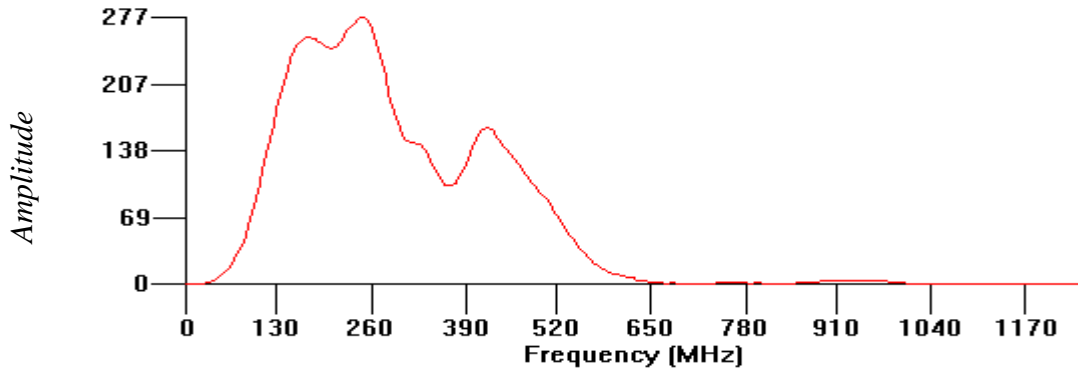
شکل ۳-۳۳ مقطع عمقی مربوط به پروفیل شماره ۴ را نمایش می دهد.



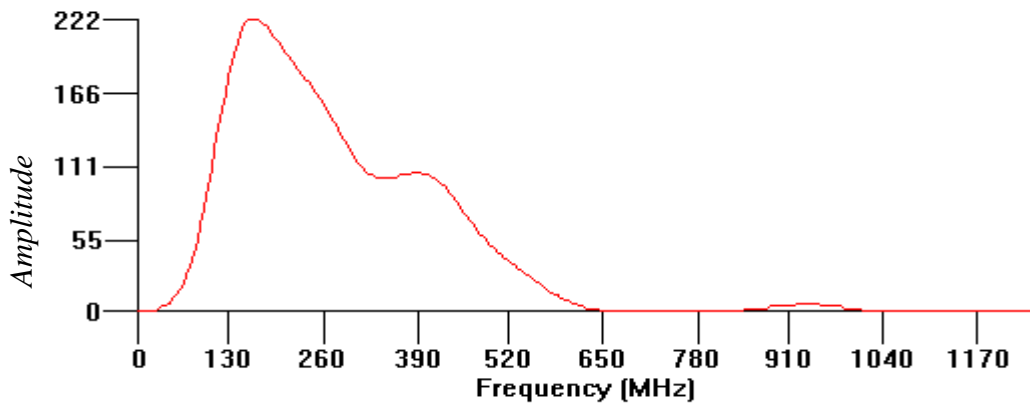
شکل ۳-۳۳: مقطع عمقی شماره ۴ بعد از اعمال پردازش های *DEWOW* و بهره *SEC*.

همان طور که در این شکل دیده می شود، عمق نفوذ سیگنال در قسمت های مرکزی مقطع (از فاصله- ۴ متری تا ۶ متری در طول پروفیل) بیشتر از عمق نفوذ در قسمت های انتهایی سمت راست مقطع است. این تفاوت در عمق نفوذ را می توان به اختلاف در میزان رطوبت و یا رس در این دو محل نسبت داد. چراکه این دو عامل نقش اصلی را در تضعیف سیگنال های رادار در زمین ایفا می کنند. بنابراین می توان گفت که میزان رطوبت و رس در قسمت های انتهایی این مقطع، که سیگنال های رادار دچار تضعیف بیشتری شده اند بالاتر از قسمت های مرکزی است.

طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله ۴/۵ تا ۵ متری و ردهای برداشت شده از فاصله ۷/۵ تا ۸ متری این مقطع به ترتیب در شکل‌های ۳-۳۴ و ۳-۳۵ نمایش داده شده‌اند. مقایسه این دو طیف نیز تفاوت در میزان تضعیف را آشکار می‌کند.



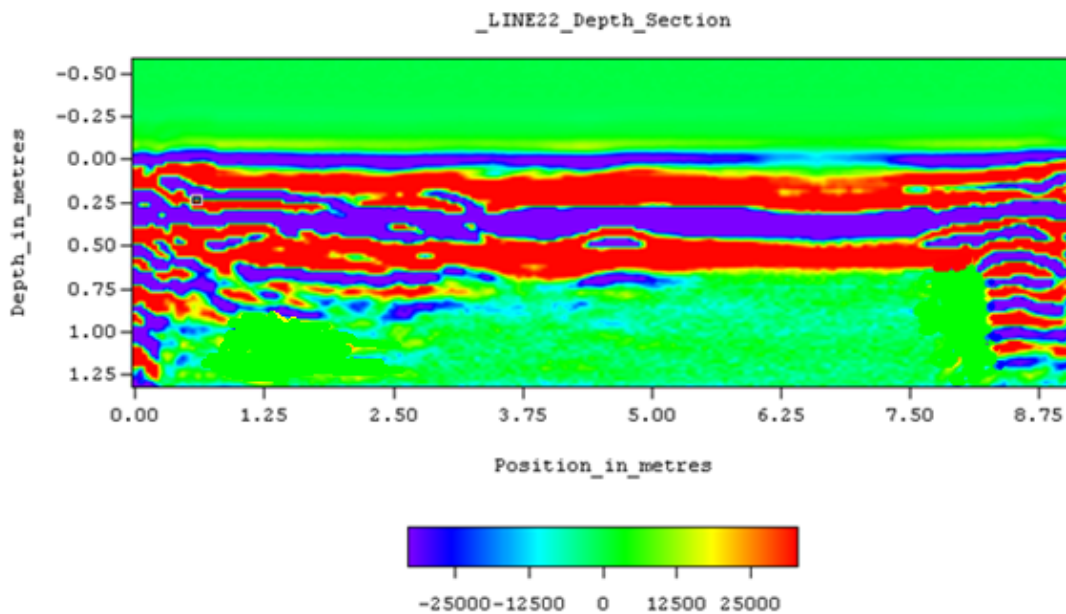
شکل ۳-۳۴: طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله‌ی ۴/۵ تا ۵ متری پروفیل شماره ۴.



شکل ۳-۳۵: طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله‌ی ۷/۵ تا ۸ متری پروفیل شماره ۴.

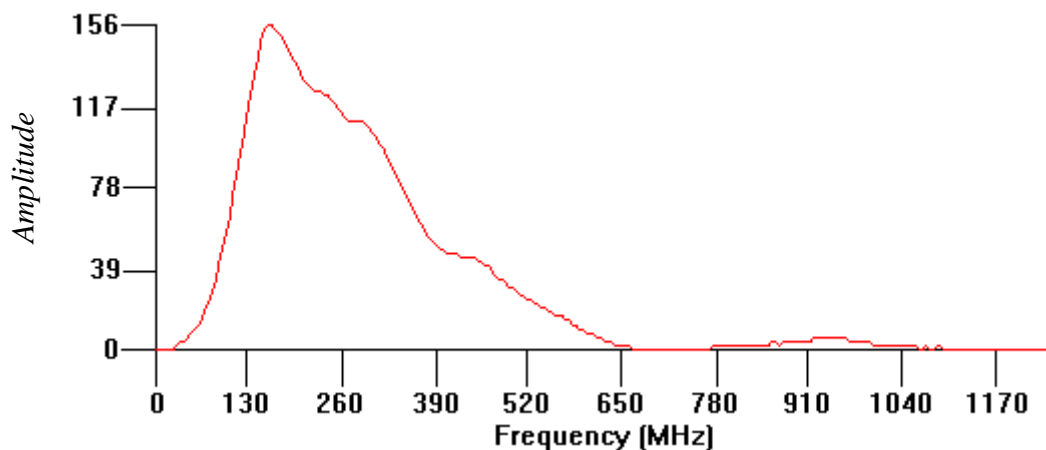
مقایسه‌ی این دو طیف فرکانسی نشان می‌دهد که در ردهای برداشت شده از فاصله‌ی ۴/۵ تا ۵ متری این پروفیل، فرکانس غالب حدود ۲۵۰ مگاهرتز است. در حالی که فرکانس غالب در ردهای برداشت شده از فاصله ۷/۵ تا ۸ متری این پروفیل، حدود ۱۶۰ مگاهرتز است که این امر ناشی از تضعیف بیشتر فرکانس‌های بالای سیگنال توسط محیط‌های با رسانندگی بالاست.

نظیر این پدیده را می‌توان در مقطع عمقی پروفیل شماره‌ی ۲۲ نیز مشاهده کرد. این مقطع عمقی در شکل ۳-۳۶ نمایش داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که در قسمت انتهایی این پروفیل یک کانال فاضلاب وجود دارد. این کانال کاملاً خشک بوده و همانند یک حفره هوا عمل می‌کند. در نتیجه وجود این کانال باعث کاهش تضعیف سیگنال‌های رادار و افزایش عمق نفوذ می‌شود.

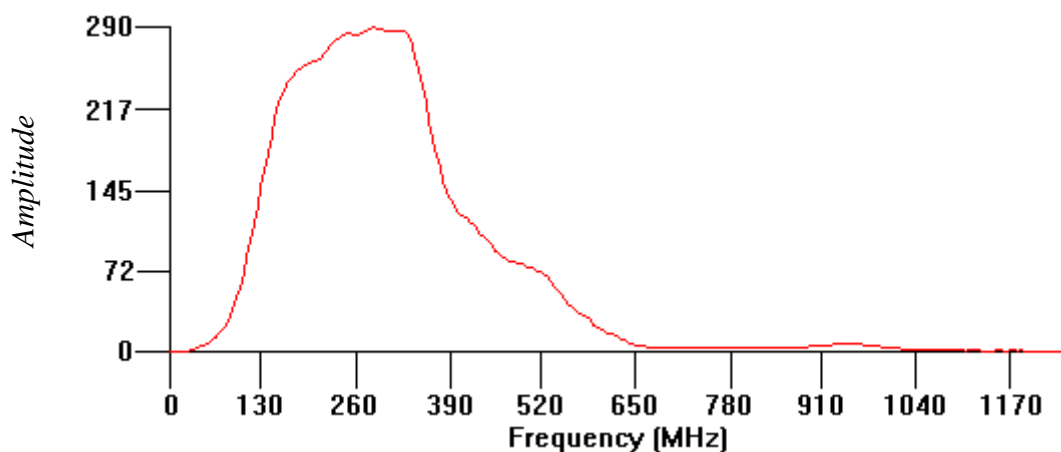


شکل ۳-۳۶: مقطع عمقی شماره ی ۲۲ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره‌*SEC*

طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله ۶ تا ۶/۵ متری و ردهای برداشت شده از فاصله ۸/۳ تا ۸/۷ متری این پروفیل به ترتیب در شکل‌های ۳-۳۷ و ۳-۳۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳-۳۷: طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله ۶ تا ۶/۵ متری پروفیل شماره ۲۲.



شکل ۳-۳۸: طیف میانگین فرکانسی ردهای برداشت شده از فاصله ۸/۳ تا ۸/۷ متری پروفیل شماره ۲۲.

مقایسه طیف میانگین فرکانسی در این دو محدوده نشان می‌دهد که در فاصله ۶ تا ۶/۵ متری این پروفیل، فرکانس غالب حدود ۱۶۰ مگاهرتز و در فاصله ۸/۳ تا ۸/۷ متری حدود ۲۵۰ مگاهرتز است. بنابراین در قسمت انتهایی پروفیل به دلیل وجود کانال هوا، میزان تضعیف فرکانس‌های بالای سیگنال کمتر از قسمت‌های مرکزی آن است.

فصل (۴)

تعیین درصد حفرات هوای موجود در نمونه‌های

آسفالتی با روش *GPR*

۴-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد، درصد حفرات هوای موجود در آسفالت نقش مهمی را در پایداری و طول عمر آن دارد. در روش‌های معمول از مغزه‌های آسفالتی برای تعیین درصد حفرات هوا استفاده می‌شود. در این فصل به بررسی نحوه‌ی تعیین ثابت دی‌الکتریک آسفالت به کمک *GPR* و ایجاد ارتباط بین این کمیت و درصد حفرات هوای آسفالت می‌پردازیم.

۴-۲- تهیه نمونه‌های آسفالتی

برای بررسی درصد حفرات هوای آسفالت، از ۱۲ نمونه استوانه‌ای آسفالت با درجات مختلف تراکم استفاده شد. قطر هر یک از این نمونه‌های آسفالتی ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع آنها حدود ۱۰ سانتی‌متر است. این نمونه‌ها مطابق با استاندارد *ASTM D2041* و در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وابسته به وزارت راه و ترابری تهیه شدند. در این روش مصالح سنگی را همراه با درصد مشخصی از قیر حرارت داده و با یکدیگر مخلوط می‌کنند. سپس این مصالح را داخل یک محفظه استوانه‌ای شکل ریخته و متراکم می‌کنند. متراکم کردن مصالح با استفاده از یک چکش تراکم به وزن مشخص (۲/۱ کیلوگرم که از ارتفاع ثابت و مشخص ۴۵۷ میلی‌متری روی مصالح سقوط می‌کند، انجام می‌شود. براساس تعداد ضرباتی که به مصالح وارد می‌شود، می‌توان نمونه‌هایی با درجات تراکم مختلف تهیه کرد.

جدول ۴-۱ مشخصات فنی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۱: مشخصات فنی نمونه‌های آسفالت.

وزن مخصوص قیر ($\frac{gr}{cm^3}$)	وزن مخصوص مصالح سنگی ($\frac{gr}{cm^3}$)	درصد وزنی قیر
۱/۰۱۴	۲/۶۱۶	۴/۲

لازم به ذکر است که مشخصات ذکر شده در جدول ۴-۱ برای تمام نمونه‌های تهیه شده یکسان است و بنابراین این نمونه‌ها فقط از لحاظ درصد حفرات هوا با یکدیگر اختلاف دارند. در جدول ۴-۲ تعداد ضربات وارد شده به هر نمونه نمایش داده شده است.

جدول ۴-۲: تعداد ضربات چکش تراکم وارده به هر یک از نمونه‌ها.

شماره نمونه	تعداد ضربات چکش تراکم
۱	۵
۲	۱۰
۳	۲۰
۴	۳۰
۵	۴۰
۶	۵۰
۷	۶۰
۸	۷۰
۹	۸۰
۱۰	۹۰
۱۱	۱۰۰
۱۲	۱۱۰

باید به این نکته توجه داشت که ارتفاع این نمونه‌ها یکسان نیست بلکه با افزایش تعداد ضربات چکش، ارتفاع این نمونه‌ها کاهش می‌یابد، به طوری که ارتفاع اولین نمونه ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع آخرین نمونه ۹ سانتی‌متر است.

۴-۳- نتایج به دست آمده از روش *GPR* بر روی نمونه‌های آسفالتی

برای بررسی حفرات هوای نمونه‌های استوانه‌ای، از دستگاه *MALA* ساخت شرکت سوئدی *MALA GeoScience* و متعلق به سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شد.

فرکانس مرکزی آنتن در این دستگاه ۸۰۰ مگاهرتز و از نوع پوشش‌دار^{۶۵} می‌باشد. در این دستگاه فاصله بین فرستنده و گیرنده برابر با ۱۰ سانتی‌متر است که نسبت به قطر نمونه‌های آسفالتی (۱۵ سانتی‌متر) کوچکتر می‌باشد.

برای تعیین میزان حفرات هوای نمونه‌های آسفالتی، ابتدا لازم است که مقدار ثابت دی‌الکتریک هر یک از نمونه‌ها تعیین شود. ثابت دی‌الکتریک نمونه‌ها با استفاده از روش بازتابش سطحی تعیین می‌شود (رابطه ی ۲-۳۴). برای این منظور هر یک از نمونه‌های استوانه‌ای در زیر آنتن و به فاصله چند سانتی‌متری از آن و بر روی یک صفحه سنگی قرار می‌گیرد. به‌طوری که نقطه وسط بین آنتن فرستنده و گیرنده دقیقاً بر مرکز سطح مقطع دایره‌ای شکل نمونه‌ها منطبق شود. صفحه سنگی که نمونه‌ها روی آن قرار می‌گیرند و نیز چارچوبی که آنتن روی آن قرار می‌گیرد، باید به‌صورت کاملاً افقی تراز شوند. ارتفاع آنتن از سطح نمونه‌ها باید طوری تنظیم شود که هیچ‌گونه تداخلی بین پالس مستقیم و پالس بازتاب شده از سطح نمونه اتفاق نیفتد، چراکه در غیر این صورت اندازه‌گیری دامنه پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ها غیر ممکن می‌شود. برای این منظور ارتفاع آنتن از سطح نمونه حدود ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (علت حدودی بودن این فاصله تغییرات کوچک در ارتفاع نمونه‌هاست).

برداشت داده‌ها برای هر نمونه در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول چندین رد مستقیماً از سطح نمونه برداشت می‌شود. سپس در مرحله بعدی یک صفحه فلزی (از جنس آلومینیوم) به قطر ۱۵ سانتی‌متر (برابر با قطر نمونه) بر روی سطح همان نمونه قرار داده شده و مجدداً چندین رد از سطح فلز برداشت می‌شود. این دو مرحله برای هر ۱۲ نمونه انجام گرفت. نحوه برداشت داده‌ها و قرارگیری نمونه‌ها در زیر آنتن در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲ نمایش داده شده‌اند.

⁶⁵ Shielded



شکل ۴-۱: برداشت ردها از سطح نمونه.



شکل ۴-۲: برداشت ردها از روی صفحه ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه.

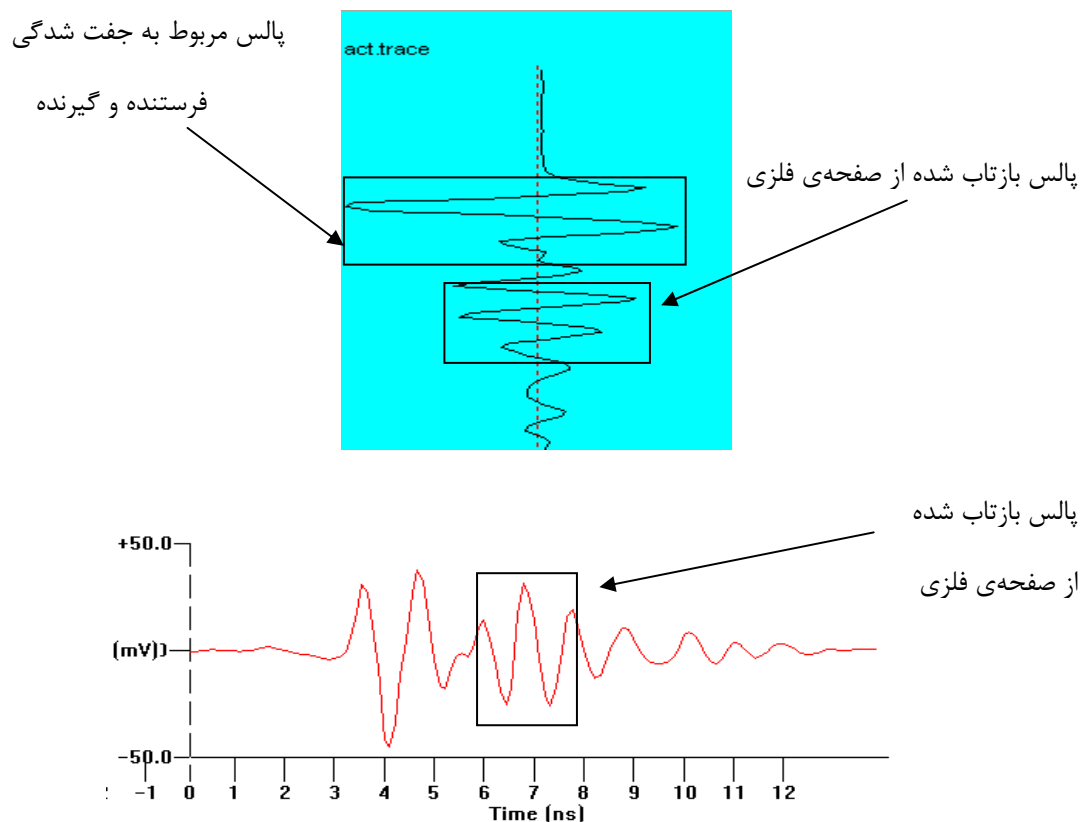
یک نکته مهم در برداشت داده‌ها این است که داده‌ها باید با انباشتگی^{۶۶} بالا برداشت شوند. عمل انباشتگی شامل فرایندی است که در آن از تعداد زیادی رد برداشت شده میانگین‌گیری شده و مقدار میانگین به عنوان نتیجه نهایی ذخیره می‌شود. این عمل موجب افزایش نسبت سیگنال به نوفه شده و پایداری سیگنال را افزایش می‌دهد. مقدار انباشتگی از یک شروع می‌شود و به صورت دو دویی^{۶۷} (2ⁿ) تا ۲۰۴۸ افزایش می‌یابد. تجربیات نشان داد که اگر برداشت داده‌ها با انباشتگی پایین انجام شود، دامنه پالس‌های بازتاب شده از سطح نمونه‌ها مقدار ثابت و مشخصی ندارد و نمی‌توان از آن‌ها در

⁶⁶ Stack
⁶⁷ Binary

بررسی‌های کیفی آسفالت استفاده کرد. به‌همین دلیل در برداشت این داده‌ها از انباشتگی ۲۵۶ استفاده شد.

داده‌های جمع‌آوری شده با آنتن *MALA* دارای فرمت *Rd3* بوده و با استفاده از نرم‌افزار *2D Quick* قابل بررسی هستند. این نرم‌افزار قادر است فرمت *Rd3* داده را به فرمت *DT1* تبدیل کند تا بتوان داده‌ها را در نرم‌افزار *Win Ekko Pro* نیز مورد بررسی قرار داد.

شکل ۳-۴ پالس بازتاب شده از سطح صفحه فلزی شکل را که بر روی یکی از نمونه‌ها قرار گرفته در دو نرم‌افزار *Reflex-2D Quick* (بالا) و *Win Ekko pro* (پایین) نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۳: پالس بازتاب شده از سطح صفحه‌ی فلزی.

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است، در هر دو تصویر به دست آمده از نرم‌افزارهای

پالس بازتاب شده از سطح صفحه فلزی به صورت یک پالس *Reflex 2D quick* و *Win Ekko Pro*

مثبت است که در زمان $6/8$ نانو ثانیه اتفاق افتاده است. بنابراین پالس بازتاب شده از سطح تمام

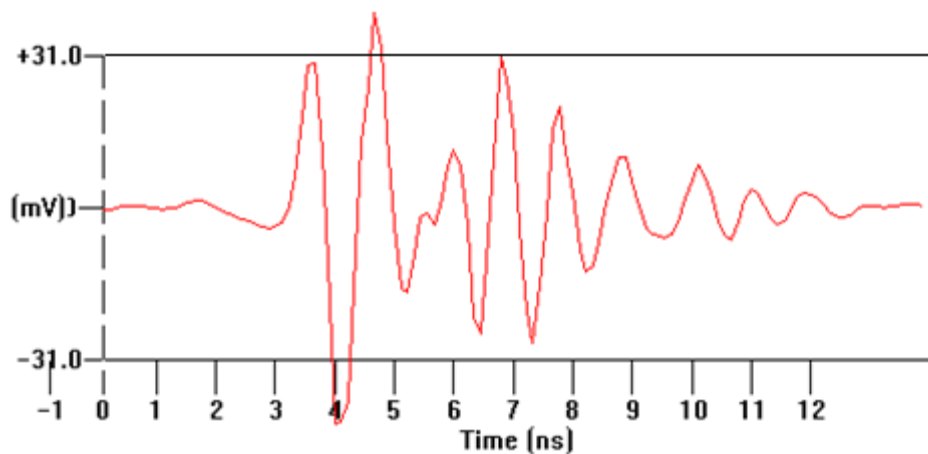
نمونه‌ها نیز تقریباً در همین زمان واقع می‌شود.

در شکل‌های ۴-۴ تا ۲۷-۴ پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌های مختلف و پالس بازتاب شده از صفحه

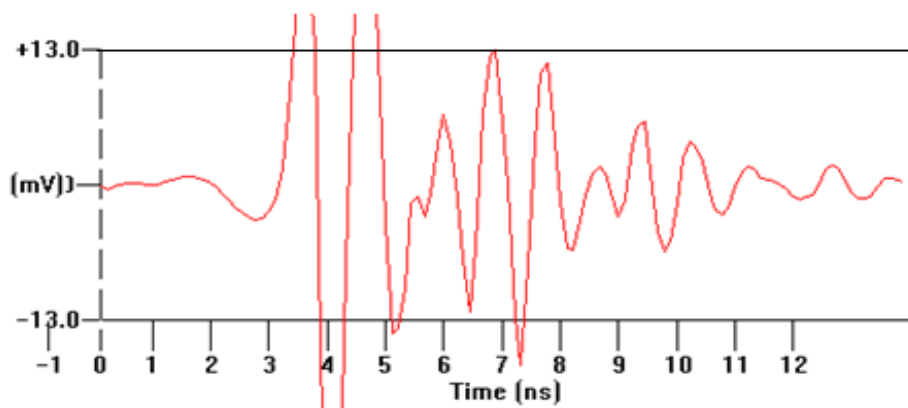
فلزی در حالتی که بر روی نمونه قرار گرفته، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمام این

شکل‌ها دامنه پالس بازتابی از سطح نمونه‌ها و پالس بازتابی از سطح صفحه فلزی با یک خط افقی

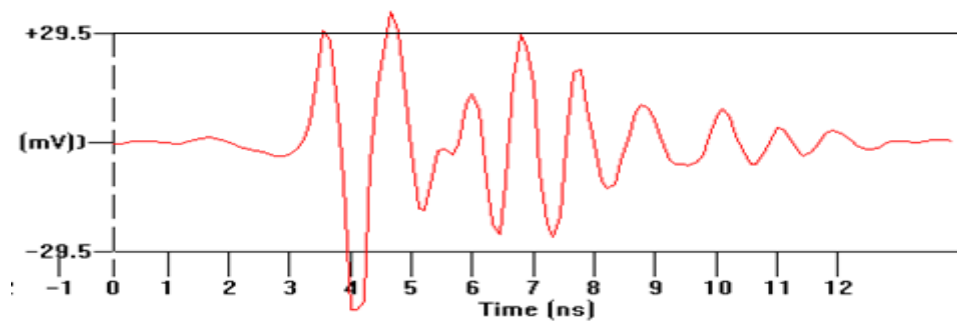
سیاه رنگ بر روی محور عمودی مشخص شده است.



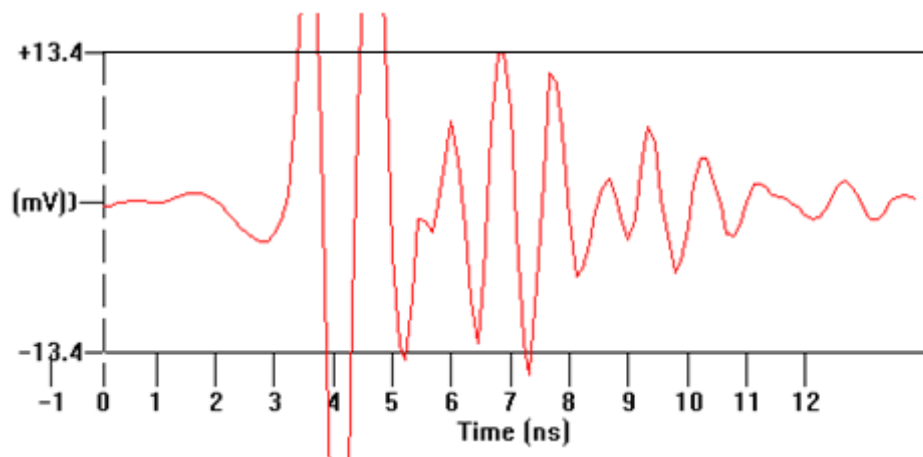
شکل ۴-۴: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۱.



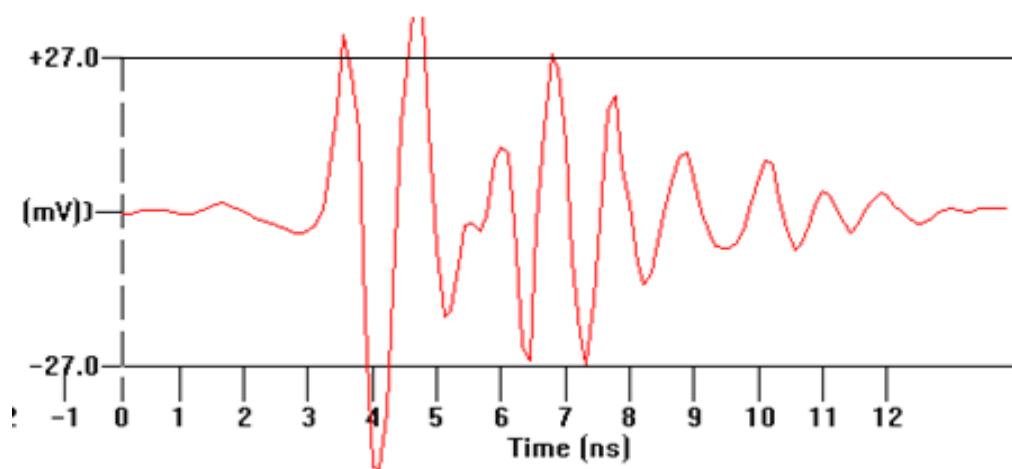
شکل ۴-۵: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی ۱.



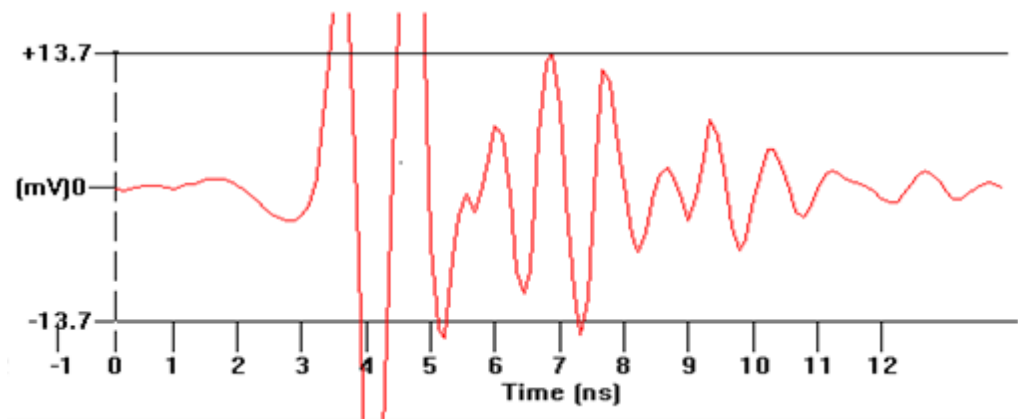
شکل ۴-۶: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۲.



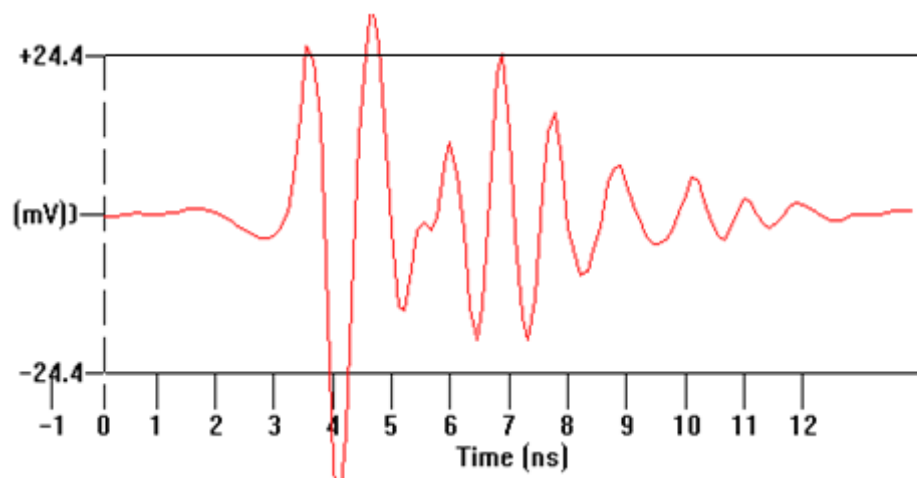
شکل ۴-۷: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۲.



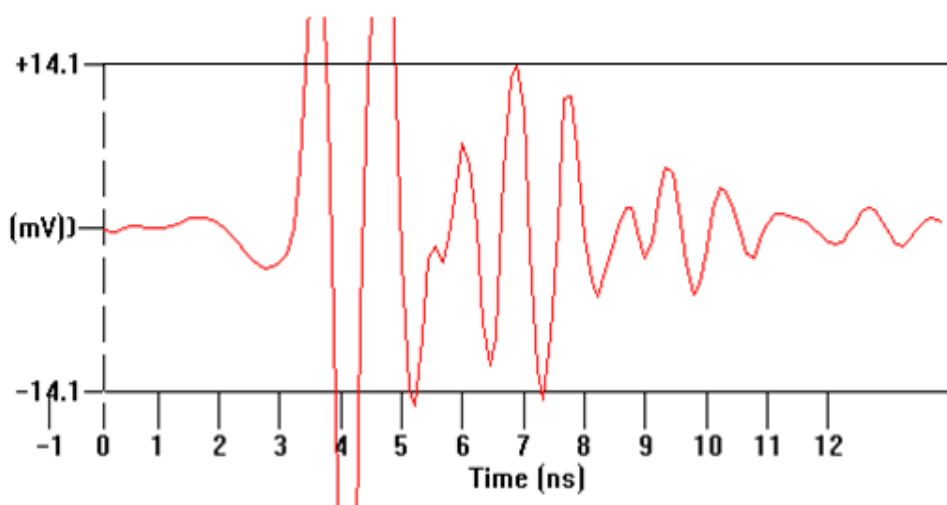
شکل ۴-۸: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۳.



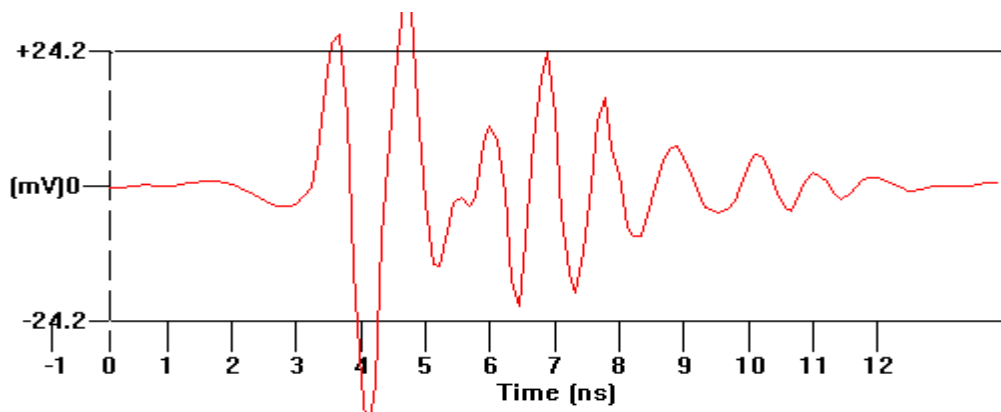
شکل ۴-۹: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۳.



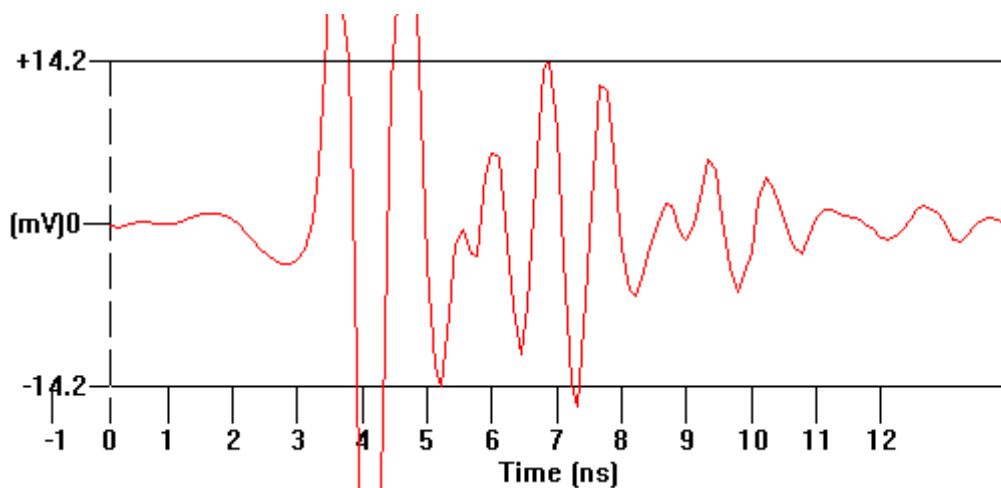
شکل ۴-۱۰: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۴.



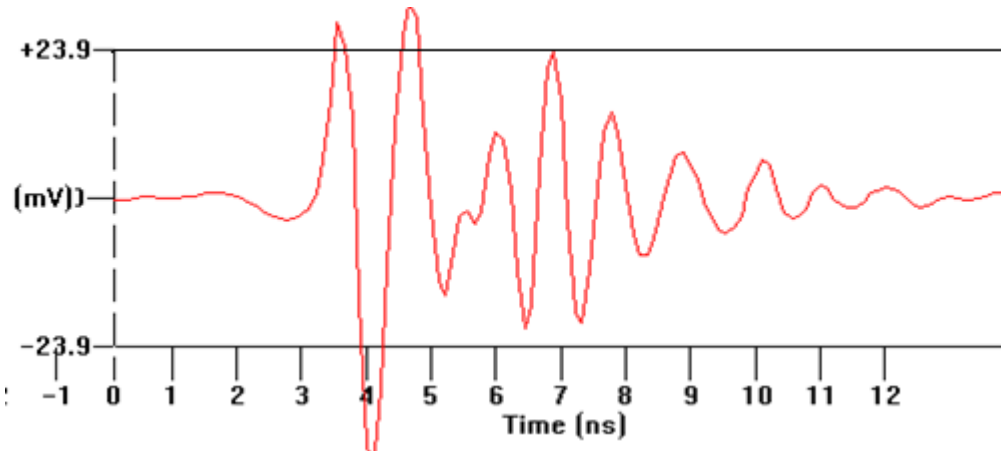
شکل ۴-۱۱: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۴.



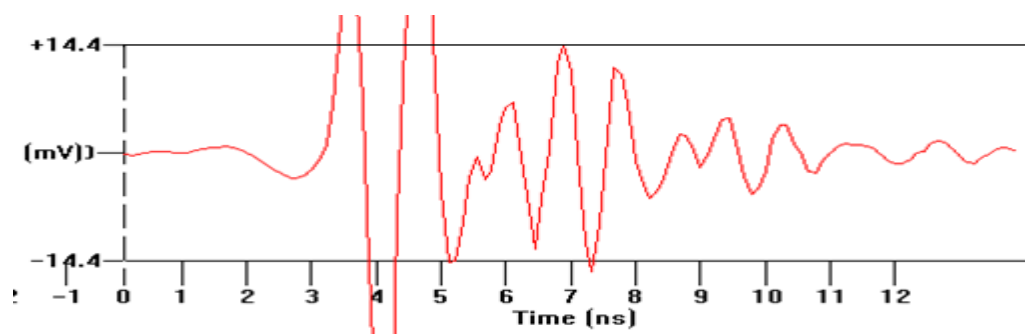
شکل ۴-۱۲: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۵.



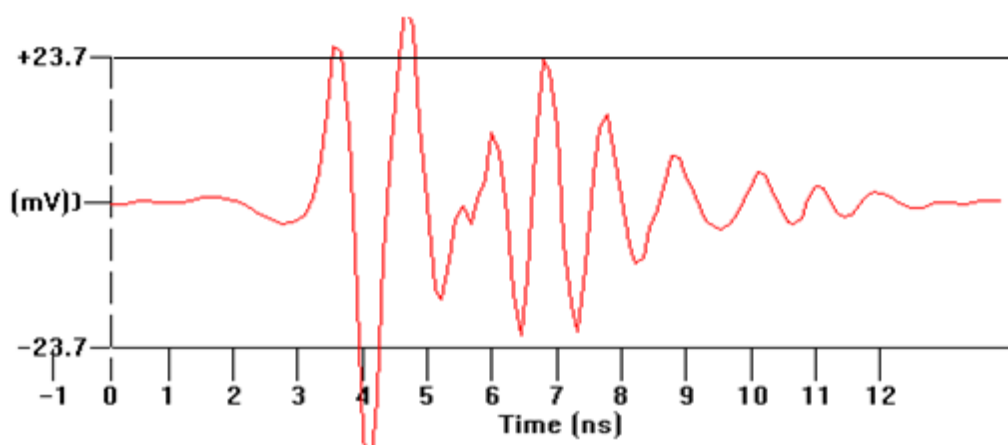
شکل ۴-۱۳: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۵.



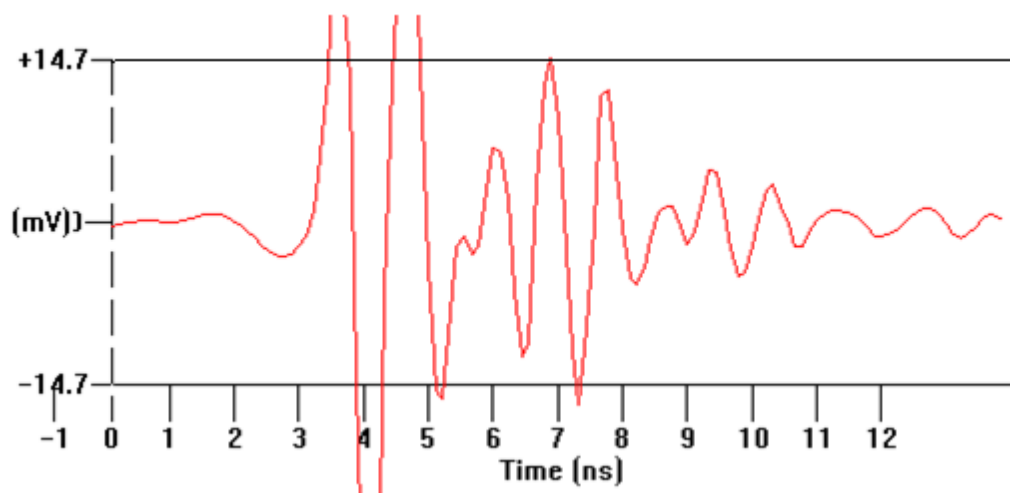
شکل ۴-۱۴: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۶.



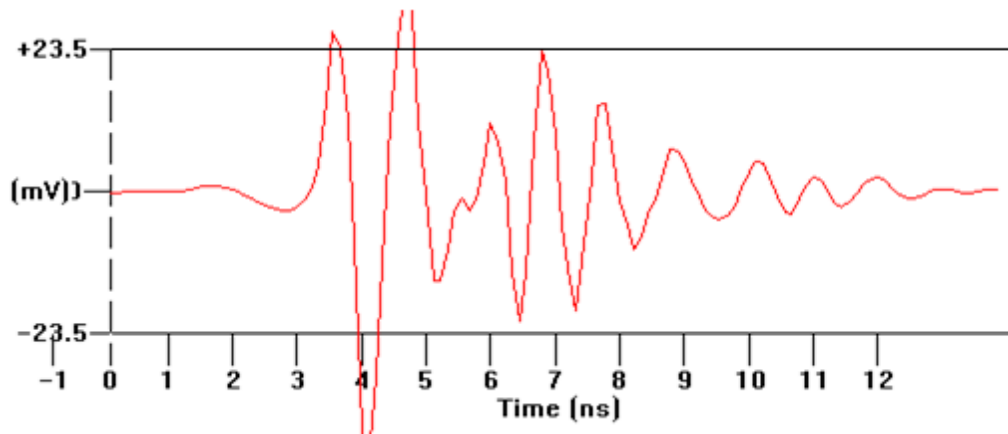
شکل ۴-۱۵: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۶.



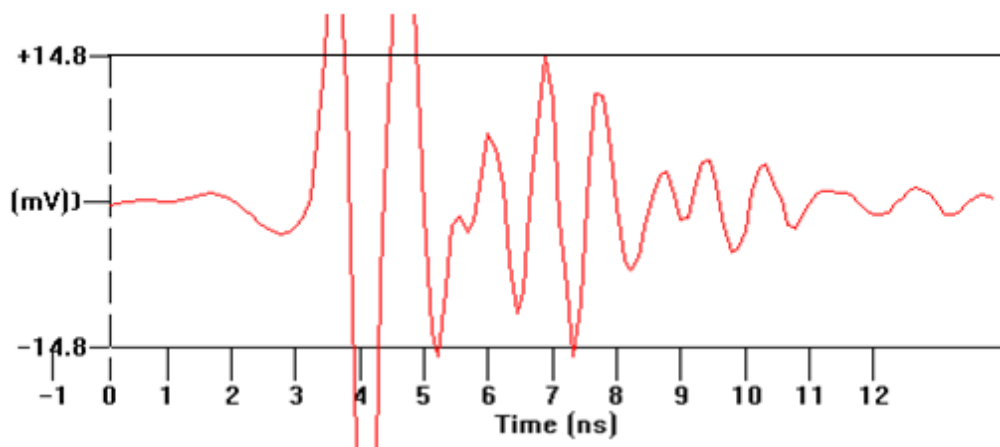
شکل ۴-۱۶: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۷.



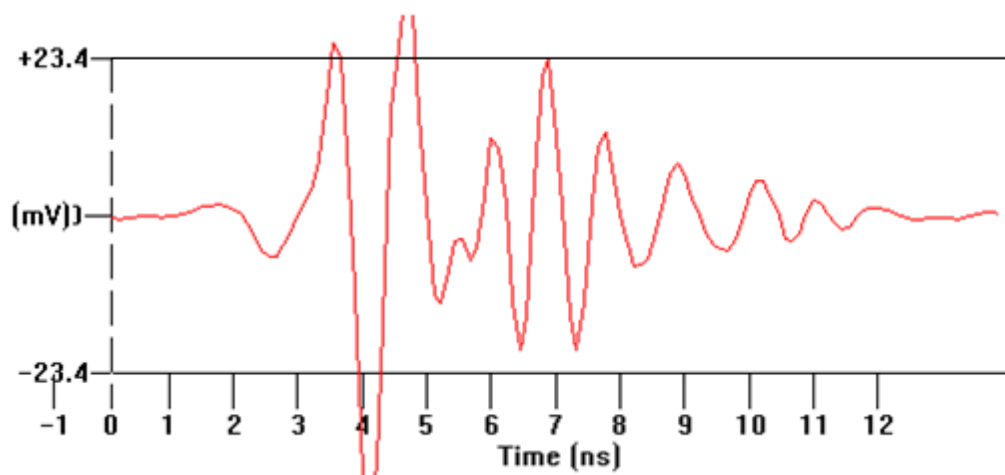
شکل ۴-۱۷: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۷.



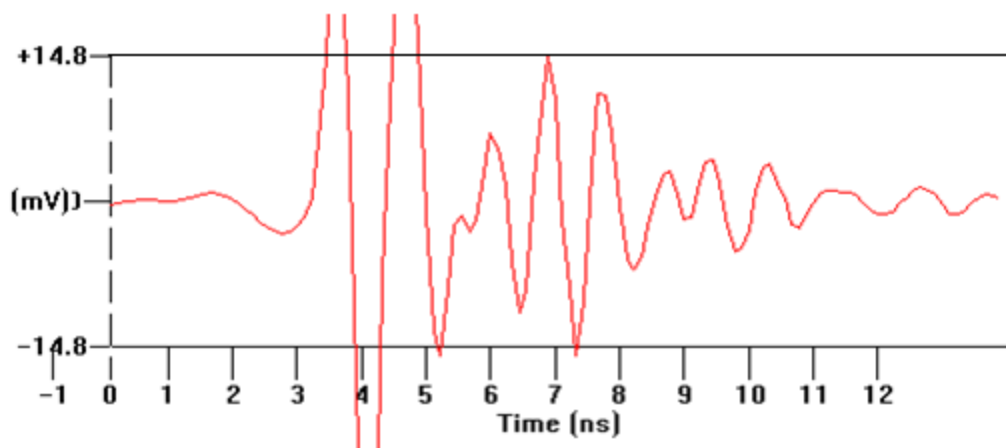
شکل ۴-۱۸: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۸



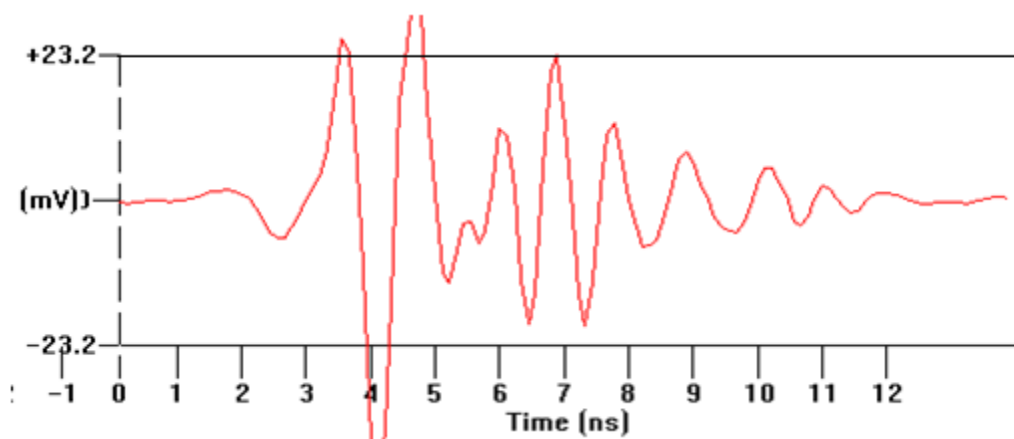
شکل ۴-۱۹: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۸



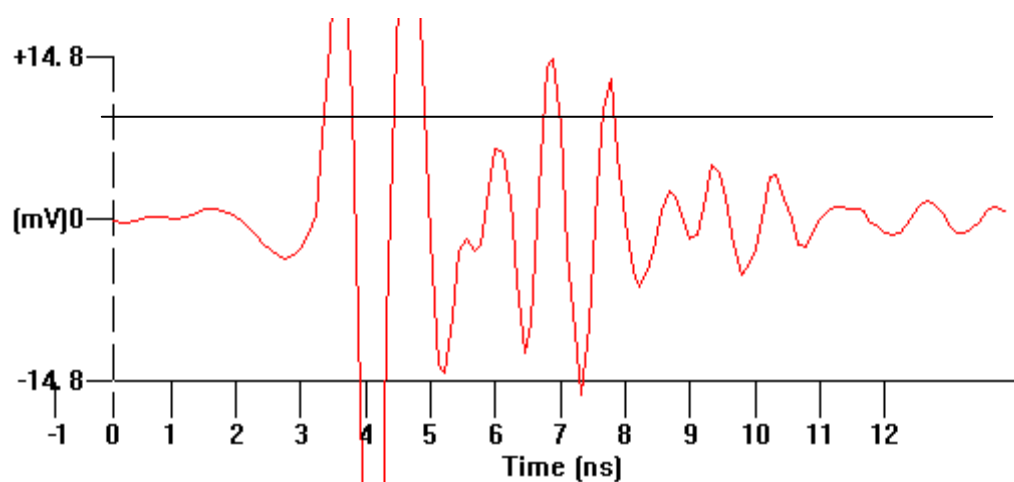
شکل ۴-۲۰: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۹



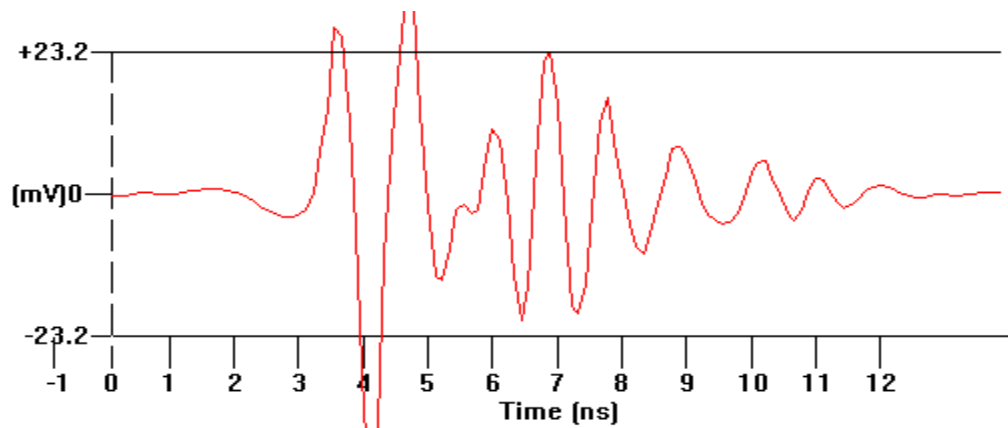
شکل ۴-۲۱: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۹.



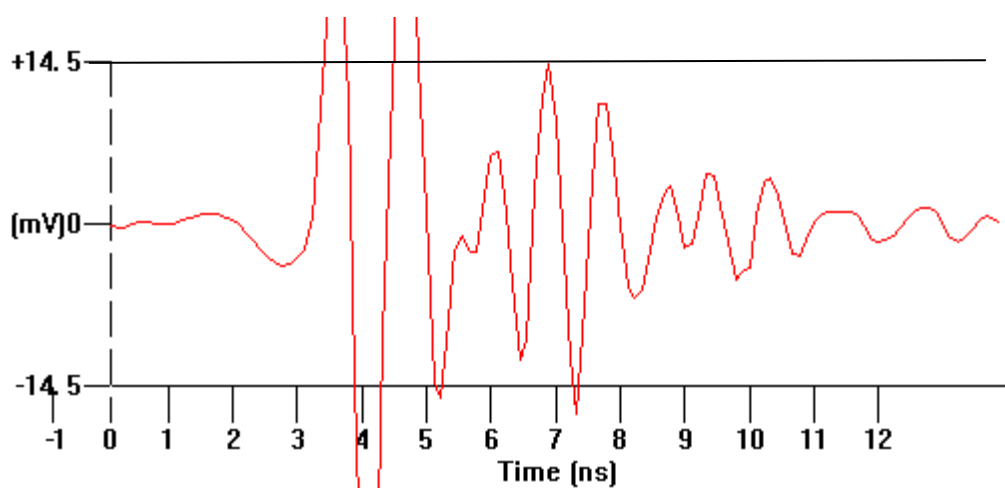
شکل ۴-۲۲: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۱۰.



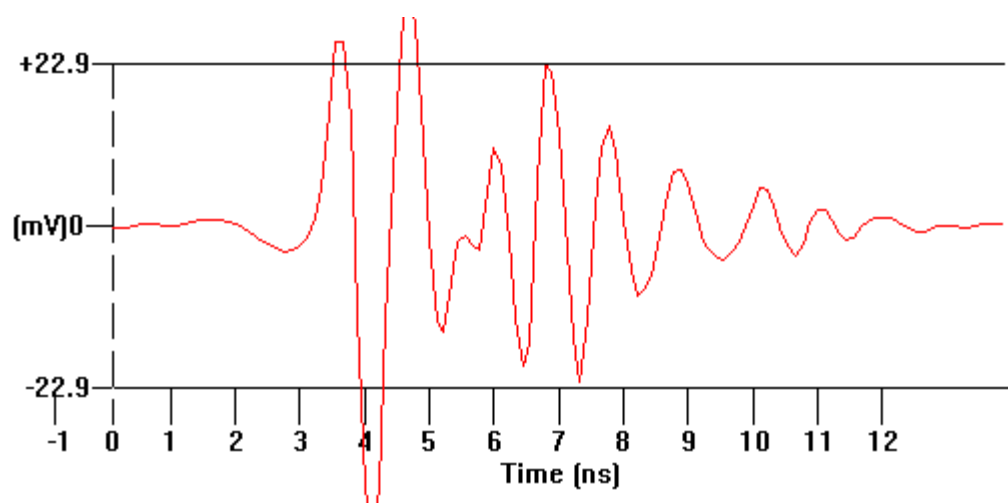
شکل ۴-۲۳: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۱۰.



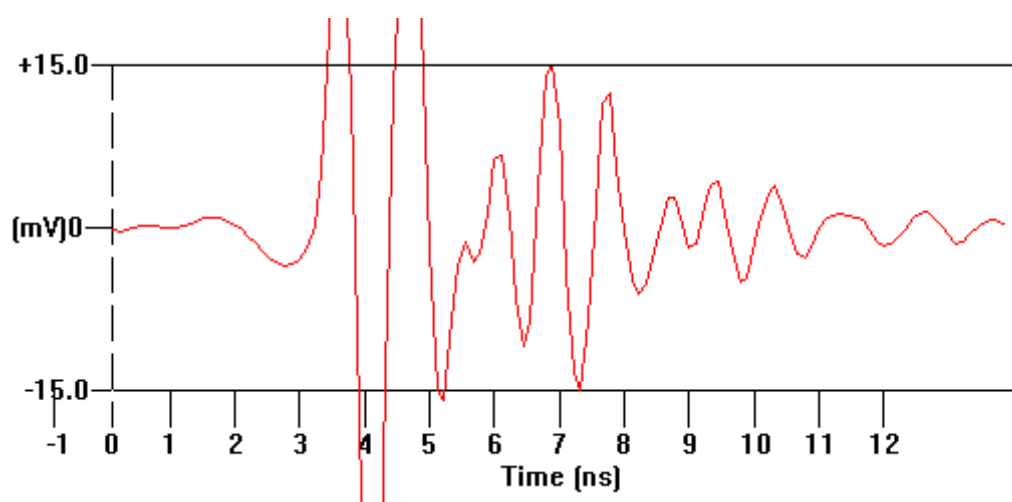
شکل ۴-۲۴: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۱.



شکل ۴-۲۵: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۱۱.



شکل ۴-۲۶: پالس بازتابی از صفحه‌ی فلزی قرار گرفته بر روی نمونه‌ی شماره‌ی ۱۲.



شکل ۶-۲۷: پالس بازتابی از سطح نمونه‌ی شماره‌ی ۱۲.

تغییرات در شدت پالس بازتاب شده از سطح فلزی برای نمونه‌های مختلف ناشی از تغییرات در ارتفاع نمونه‌ها و یا به عبارتی تغییر در فاصله بین آنتن و سطح نمونه است. در واقع هرچه فاصله‌ی صفحه‌ی فلزی از آنتن بیشتر باشد، شدت پالس بازتابی از آن کمتر خواهد شد. بنابراین شدت پالس بازتابی از سطح صفحه فلزی قرار گرفته بر روی نمونه شماره ۱ که بیشترین ارتفاع را دارد، بیشینه^{۶۸} و برای نمونه شماره ۱۲ که کمترین ارتفاع را دارد، کمینه^{۶۹} است. این درحالی است که شدت پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌های آسفالتی با کاهش ارتفاع آنها کاهش نمی‌یابد. دلیل آن این است که نمونه‌هایی که ارتفاع کمتری دارند متراکم‌ترند و بدلیل کم بودن حفرات هوا در آنها ثابت دی‌الکتریک بالاتری دارند و در نتیجه پالس بازتاب شده از سطح آنها نیز شدیدتر خواهد بود. نکته‌ی دیگری که باید به آن توجه داشت مغشوش بودن شکل پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌های آسفالتی است که علت آن تأثیر پالس‌های بازتابی از اطراف نمونه (سطح زمین) بر پالس بازتابی از سطح نمونه آسفالت است.

در جدول ۴-۳ دامنه پالس بازتاب شده از صفحه فلزی و سطح نمونه‌ها به همراه ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده (از طریق رابطه ۲-۳۴) برای هر یک از آنها نمایش داده شده است.

⁶⁸ Maximum

⁶⁹ Minimum

جدول ۴-۳: محاسبه‌ی ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های آسفالتی.

شماره نمونه	دامنه ی پالس انعکاسی از سطح نمونه	دامنه ی پالس انعکاسی از صفحه ی فلزی	گذردهی دی‌الکتریک نسبی نمونه
۱	۱۳	۳۱	۶
۲	۱۳/۴	۲۹/۵	۷/۱
۳	۱۳/۷	۲۷	۹/۴
۴	۱۴/۱	۲۴/۴	۱۴
۶	۱۴/۴	۲۳/۹	۱۶/۳
۷	۱۴/۷	۲۳/۷	۱۸/۲
۸	۱۴/۸	۲۳/۵	۱۹/۳
۹	۱۴/۸	۲۳/۴	۱۹/۷
۱۰	۱۴/۸	۲۳/۲	۲۰/۵
۱۱	۱۴/۵	۲۳/۲	۱۸/۸
۱۲	۱۵	۲۲/۹	۲۳

۴-۴- تعیین درصد حفرات هوای نمونه‌های آسفالتی

برای تعیین درصد حفرات هوای نمونه‌ها ابتدا لازم است که وزن مخصوص هر یک از آن‌ها دقیقاً تعیین شود. تعیین وزن مخصوص نمونه‌ها با استفاده از روش استاندارد *ASTM D2726* در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری انجام گرفت. در این روش ابتدا وزن نمونه در هوا اندازه‌گیری می‌شود. سپس آن را در حالتی که کاملاً داخل آب قرار دارد وزن می‌کنند. اختلاف وزن نمونه در هوا (W_a) و در آب (W_w) برابر با حجم آن خواهد بود. در این صورت وزن مخصوص نمونه از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱].

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_a - W_w} \quad (1-4)$$

درصد حفرات هوای نمونه‌ها مطابق با استاندارد *ASTM D2041* و به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود

(فرض بر این است که حفرات درون آسفالت به یکدیگر مرتبط نباشند) [۲۱].

$$V\% = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (۲-۴)$$

در این رابطه G_{mb} وزن مخصوص توده آسفالتی و G_{mm} حداکثر وزن مخصوص آسفالت است. مقدار G_{mm} توسط آزمایشگاه تهیه کننده نمونه‌ها تعیین شده و برابر با $۲/۵۲۵$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در جدول ۴-۴ وزن مخصوص و درصد حفرات هوای هر یک از نمونه‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۴-۴: تعیین درصد حفرات هوای نمونه های آسفالتی.

درصد حفرات هوا	وزن مخصوص $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$	شماره نمونه
۲۱/۶	۱/۹۵۰	۱
۱۵/۲	۲/۱۴۱	۲
۱۱/۷	۲/۲۳۰	۳
۸/۷	۲/۳۰۵	۴
۷/۶	۲/۳۲۰	۵
۶/۹	۲/۳۵۲	۶
۵	۲/۳۹۹	۷
۴/۸	۲/۴۰۵	۸
۳/۶	۲/۴۳۵	۹
۳/۳	۲/۴۴۲	۱۰
۲/۷	۲/۴۵۸	۱۱
۲/۵	۲/۴۶۲	۱۲

۴-۵- رابطه بین درصد حفرات هوا و ثابت دی الکتریک نمونه‌ها

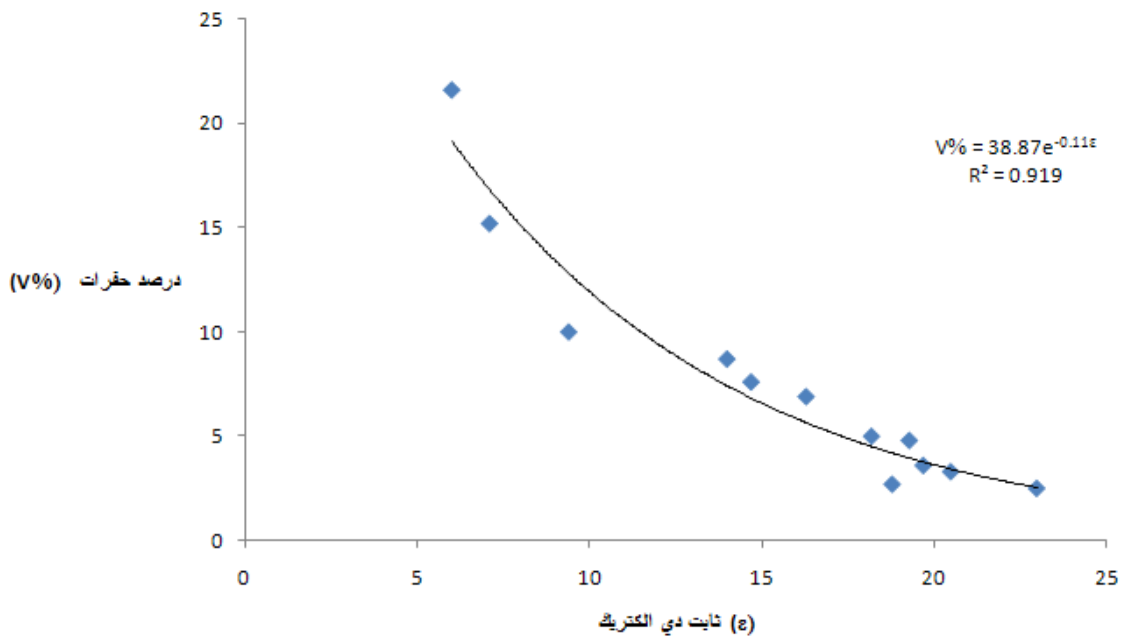
در جدول ۴-۵ مقادیر ثابت دی الکتریک محاسبه شده از داده‌های *GPR* و درصد حفرات نمونه‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۴-۵: نمایش درصد حفرات هوا و ثابت دی الکتریک نمونه‌ها.

ϵ_r	V%
۶	۲۱/۶
۷/۱	۱۵/۲
۹/۴	۱۰
۱۴	۸/۷
۱۴/۷	۷/۶
۱۶/۳	۶/۹
۱۸/۲	۵
۱۹/۳	۴/۸
۱۹/۷	۳/۶
۲۰/۵	۳/۳
۱۸/۸	۲/۷
۲۳	۲/۵

برای ایجاد ارتباط بین درصد حفرات هوا و دی الکتریک نمونه‌ها، این دو کمیت به ترتیب بر روی

محورهای عمودی و افقی در شکل ۴-۲۵ نمایش داده شده اند.



شکل ۴-۲۵: نمودار درصد حفرات هوا در مقابل ثابت دی الکتریک نمونه‌ها.

همان‌طور که در نمودار شکل ۴-۲۵ مشاهده می‌شود، می‌توان رابطه‌ی بین ثابت دی الکتریک نمونه‌ها و درصد حفرات هوای آن‌ها را بصورت نمایی نشان داد. ثابت دی الکتریک نمونه‌های آسفالتی از ۶ تا ۲۳ در تغییر است، این در حالی است که ثابت دی الکتریک واقعی آسفالت بین ۲ تا ۶ قرار دارد. علت اصلی ایجاد این خطای نسبتاً بزرگ، کوچکتر بودن سطح مقطع نمونه نسبت به سطح ردپای آنتن است. در توضیح این مطلب باید گفت که با توجه به این که طول موج آنتن ۸۰۰ مگاهرتز در هوا (λ_p) برابر با ۳۷/۵ سانتی‌متر و ثابت دی الکتریک هوا (ϵ_0) برابر با ۱ می‌باشد، شعاع بزرگ بیضی ردپا (A) در فاصله‌ی (D) ۴۰ سانتی‌متری از این آنتن مطابق رابطه زیر (رابطه ۳۲-۲) برابر ۳۷ سانتی‌متر خواهد بود.

$$A = \frac{\lambda_c}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

این درحالی است که قطر نمونه‌های استوانه‌ای برابر با ۱۵ سانتی‌متر است که این عامل باعث ایجاد اختلاف بزرگ بین سطح مقطع نمونه و سطح ردپای دستگاه در فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری از آن می‌شود. در صورتی که سطح نمونه مورد بررسی از ردپای آنتن مورد استفاده بزرگتر باشد، بازتابش پالس به‌طور کامل از سطح نمونه انجام شده و محاسبات با دقت خوبی انجام می‌گیرد. با توجه به محدود بودن تجهیزات مورد استفاده، امکان اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر وجود نداشته است.

فصل (۵)

تعیین محتوای آب اساس به کمک روش

GPR

۵-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل ۲ ذکر شد، محتوای رطوبت اساس از خصوصیات مهم روسازی است که نقش مهمی را در ظرفیت باربری اساس ایفا می‌کند. لذا در این فصل به بررسی چگونگی تعیین درصد رطوبت اساس به کمک روش *GPR* می‌پردازیم.

اساس لایه‌ای است که در زیر آسفالت قرار می‌گیرد و به‌طور عمده از خرده سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است.

اساس از لحاظ نوع دانه‌بندی به پنج نوع (تیپ) تقسیم بندی می‌شود، مشخصات این پنج نوع تیپ در جدول ۵-۱ آورده شده است [۲۲].

جدول ۵-۱: مشخصات دانه‌بندی انواع اساس دانه‌ای.

نوع اساس					اندازه الک
V	IV	III	II	I	
درصد وزنی عبوری از هر الک					
-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳"
-	۱۰۰	-	-	۹۵-۱۰۰	۱ ۱/۳"
۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۷۵-۹۵	-	-	۱"
-	۶۰-۹۰	-	-	۷۰-۹۲	۳/۴"
۵۰-۱۵	۴۵-۷۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۵۰-۷۰	۳/۸"
۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۳۵-۵۵	نمره ۴
۲۵-۵۰	۲۰-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	-	نمره ۱۰
-	-	-	-	۱۲-۲۵	نمره ۳۰
۱۵-۳۰	۱۰-۳۰	۱۵-۳۰	۱-۲۰	-	نمره ۴۰
۲-۱	۲-۱	۲-۱	۲-۱	۰-۱	نمره ۲۰۰

۵-۲- تهیه نمونه اساس و برداشت داده‌ها

برای بررسی محتوای رطوبت اساس به کمک روش *GPR*، از نمونه‌های مصنوعی ساخته شده از مصالح ساختمانی استفاده شد. در این مطالعه درصدهای مشخصی از شن (که از لحاظ شکل و اندازه به دو

نوع بادامی و نخودی تقسیم می شود) و ماسه با یکدیگر مخلوط شدند، بطوری که دانه بندی این مخلوط حتی الامکان مشابه با دانه بندی یکی از انواع اساس ذکر شده در بالا (مانند اساس نوع IV) باشد.

برای تعیین نوع دانه بندی مصالح، مقدار کمی از نمونه تهیه شده را جدا شده و برای آزمایش دانه بندی استفاده می شود. آزمایش دانه بندی مصالح مطابق با استاندارد *ASTM D4220* انجام گرفت. در این روش حدود ۳ کیلوگرم از نمونه تهیه شده ابتدا در داخل کوره کاملاً خشک شده و سپس وزن می شوند. در مرحله بعد این نمونه خشک بر روی یک سری از الک هایی که قطر منافذ آنها از بالا به پایین کم می شود، قرار می گیرد. سپس با لرزش الک ها توسط دستگاه لرزاننده ^{۷۰}، نمونه خاک دانه بندی می شود. در پایان خاک باقی مانده روی هر الک وزن می شود و درصد وزنی خاک روی هر الک تعیین می گردد [۲۱].

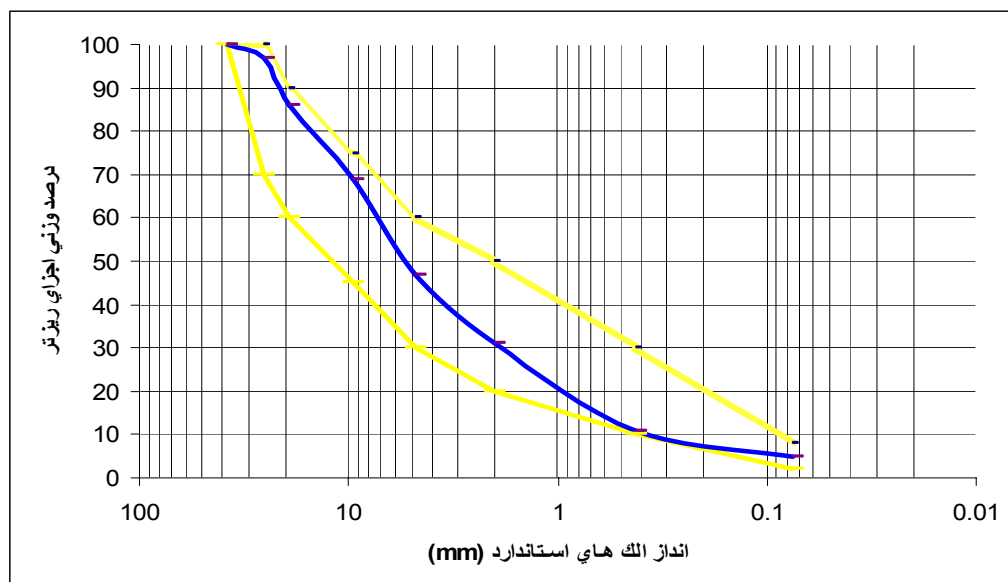
نتیجه این آزمایش روی نمونه تهیه شده در جدول ۵-۲ ملاحظه می شود.

جدول ۵-۲: نتایج دانه بندی نمونه ی اساس تهیه شده.

اندازه الک	درصد وزنی مانده بر روی هر الک	درصد وزنی عبوری از هر الک
۳"	-	-
۱ ۱/۳"	۰	۱۰۰
۱"	۳	۹۷
۳/۴"	۱۱	۸۶
۳/۸"	۱۷	۶۹
نمره ۴	۲۲	۴۷
نمره ۱۰	۱۶	۳۱
نمره ۳۰	۱۲	۱۹
نمره ۴۰	۸	۱۱
نمره ۲۰۰	۶	۵

⁷⁰Shaker

برای تعیین نوع اساس تهیه شده، منحنی دانه‌بندی آن با منحنی دانه‌بندی اساس تیپ IV مقایسه می‌شود. در شکل ۱-۵ منحنی دانه‌بندی اساس مصنوعی به همراه منحنی‌های دانه‌بندی تعیین‌کننده‌ی محدوده‌ی اساس تیپ IV با توجه به مقادیر جداول ۱-۵ و ۲-۵ ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی دانه‌بندی اساس مصنوعی که با رنگ آبی مشخص شده است، در حد فاصل بین دو منحنی زرد رنگی که محدوده‌ی اساس تیپ IV را تعیین می‌کنند، قرار می‌گیرد. بنابراین این می‌توان گفت که اساس مصنوعی مشابه با اساس تیپ IV است.



شکل ۱-۵: مقایسه منحنی دانه بندی اساس مصنوعی با منحنی دانه بندی اساس تیپ IV

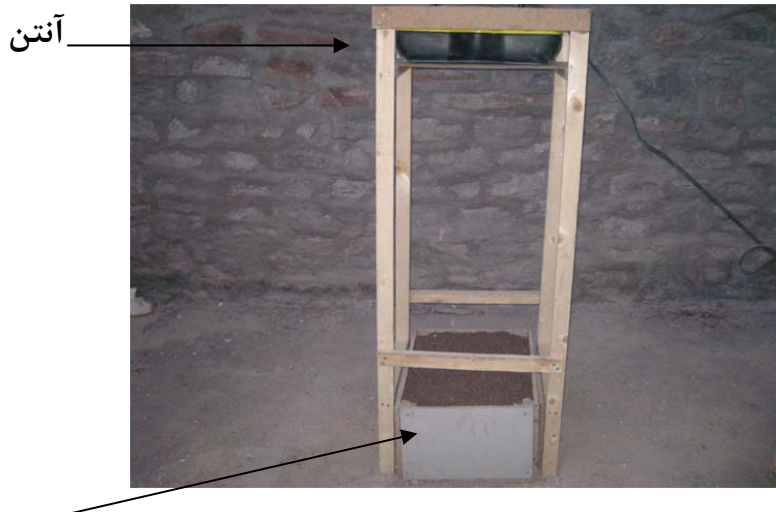
حجم نمونه تهیه شده باید به اندازه‌ای باشد که علاوه بر پر کردن یک جعبه مکعبی شکل چوبی با طول و عرض به ترتیب ۶۰ و ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، حدود ۱۰ کیلوگرم از آن نیز برای تعیین درصد رطوبت در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گیرد. از این جعبه چوبی به عنوان نگه دارنده نمونه خاک اساس استفاده می‌شود. در اینجا برای تعیین درصد رطوبت اساس از ثابت دی الکتریک آن استفاده می‌شود. ثابت دی‌الکتریک نیز با استفاده از روش بازتابش سطحی که در فصل دوم توضیح داده شد (معادله ۲-۳۴)، محاسبه می‌شود.

برای این منظور از آنتن *Noggin plus 250MHZ* متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. مشکل اصلی برای استفاده از این آنتن، پالس مستقیمی است که از فرستنده به گیرنده می‌رسد. پهنای این پالس بر روی هر رد برداشت شده توسط این آنتن حدود ۴ نانوثانیه است. اگر فاصله آنتن از سطح نمونه کم باشد، پالس بازتاب شده از سطح نمونه با پالس مستقیم دستگاه (کوپلینگ) تداخل پیدا می‌کند و در نتیجه نمی‌توان دامنه پالس بازتاب شده از سطح نمونه را به دست آورد. برای رفع این مشکل باید فاصله آنتن از سطح نمونه به حدی برسد که هیچ‌گونه تداخلی بین پالس‌های بازتاب شده و مستقیم صورت نگیرد.

ردهای برداشت شده توسط آنتن ۲۵۰ مگاهرتز در فواصل مختلف از سطح نمونه نشان می‌دهد که اگر فاصله آنتن از سطح نمونه برابر با ۱۳۵ سانتی‌متر باشد، هیچ تداخلی بین پالس مستقیم و پالس بازتاب شده از سطح صورت نمی‌گیرد.

نکته‌ی مهم دیگر این است که، ارتفاع یا بعبارت دیگر ضخامت نمونه‌ی اساس باید تا حدی باشد که همپوشانی پالس‌های بازتابی از سطوح رویی و زیرین نمونه به حداقل برسد. ضخامت ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌ی اساس، اختلاف زمانی قابل قبولی را حتی در نمونه‌های خشک، بین این دو پالس ایجاد می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود، برای ثابت نگه داشتن آنتن در ارتفاع ۱۳۵ سانتی‌متری از سطح نمونه از یک چهارپایه چوبی استفاده می‌شود. طول و عرض این چهارپایه کمی بزرگتر از طول و عرض جعبه نگه‌دارنده نمونه است. ارتفاع این چهارپایه ۱۶۵ سانتی‌متر است و در بالای آن یک محفظه چوبی تعبیه شده است که آنتن داخل آن قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که بعد از قرارگیری جعبه‌ی حاوی نمونه در زیر چهارپایه، ارتفاع کف آنتن تا سطح نمونه برابر ۱۳۵ سانتی‌متر خواهد بود.



نمونه‌ی اساس

شکل ۵-۲: برداشت داده‌ها از روی سطح نمونه‌ی اساس.

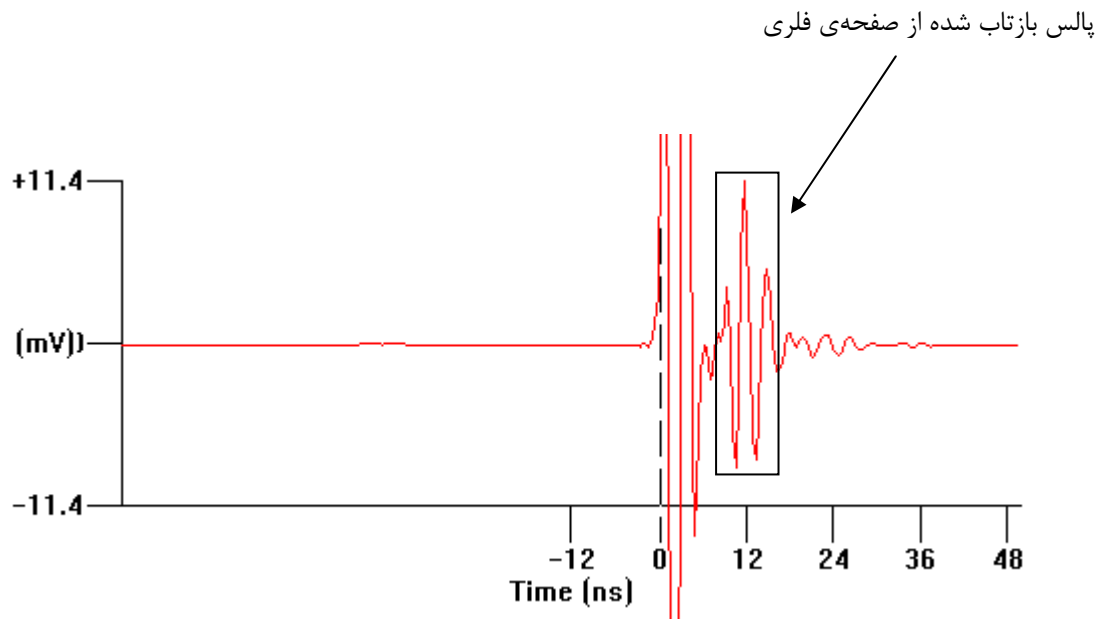
برای برداشت داده‌ها ابتدا یک صفحه فلزی به‌عنوان بازتاب کننده کامل بر روی سطح اولین نمونه قرار می‌گیرد. ابعاد این صفحه فلزی برابر با طول و عرض جعبه محتوی نمونه (۵۰×۶ سانتی‌متر) است. سپس چند رد از صفحه فلزی برداشت می‌شود. نحوه برداشت داده‌ها در حالتی که صفحه فلزی بر روی نمونه قرارگرفته است، در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۳: برداشت داده‌ها از روی سطح صفحه‌ی فلزی.

روی نمونه

شکل ۵-۴ پالس بازتاب شده از سطح صفحه فلزی را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۴: پالس بازتاب شده از صفحه‌ی فلزی.

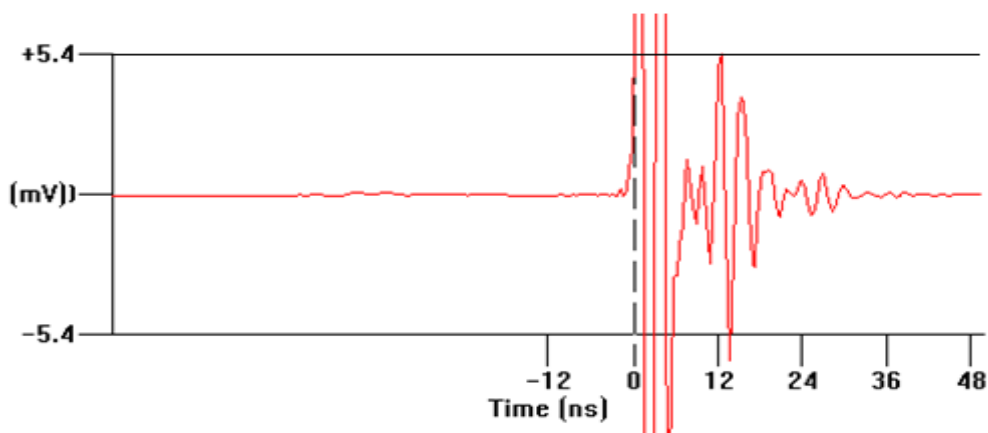
همان‌طور که از شکل ۴-۵ پیداست، پالس انعکاس یافته از سطح صفحه فلزی یک پالس مثبت با دامنه ۱۱/۴ میلی ولت است که در زمان ۱۲ نانوثانیه واقع شده است. بنابراین پالس بازتاب شده از سطح تمامی نمونه‌ها نیز در زمان ۱۲ نانوثانیه اتفاق می‌افتد و اندازه‌ی پیک مثبت در این زمان به‌عنوان دامنه پالس بازتاب شده از سطح نمونه در نظر گرفته می‌شود.

در مرحله بعد صفحه فلزی از روی سطح نمونه خشک برداشته شده و چندین رد از سطح نمونه برداشت می‌شود. پس از برداشت ردها، حدود ۱ کیلوگرم از این نمونه جهت آزمایش تعیین درصد رطوبت جدا شده و داخل کیسه‌های پلاستیکی ریخته می‌شود.

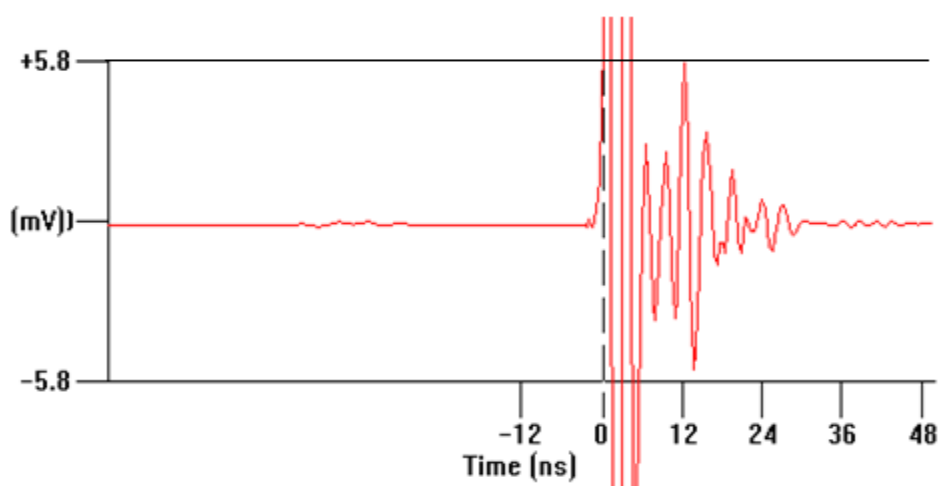
در مرحله دوم تمام نمونه خاک داخل محفظه چوبی به داخل یک محفظه بزرگتر دیگری منتقل شده و مقدار معینی آب به آن اضافه می‌شود. پس از مخلوط کردن کامل آب و نمونه خاک، مجدداً تمام محفظه چوبی تا ارتفاع ۳۰ سانتی متر با نمونه مرطوب پر می‌شود. پس از برداشت چند رد از سطح این نمونه، مقداری از آن جهت تعیین درصد رطوبت جدا می‌شود.

این عمل تا چندین مرحله انجام می‌شود. یعنی در هر مرحله مقدار معینی آب به نمونه مرحله قبل اضافه شده و چند رد از سطح آن برداشت می‌شود. این امر کمک می‌کند تا دامنه پالس بازتابی از سطح نمونه‌هایی با درصد رطوبت‌های مختلف به دست آید.

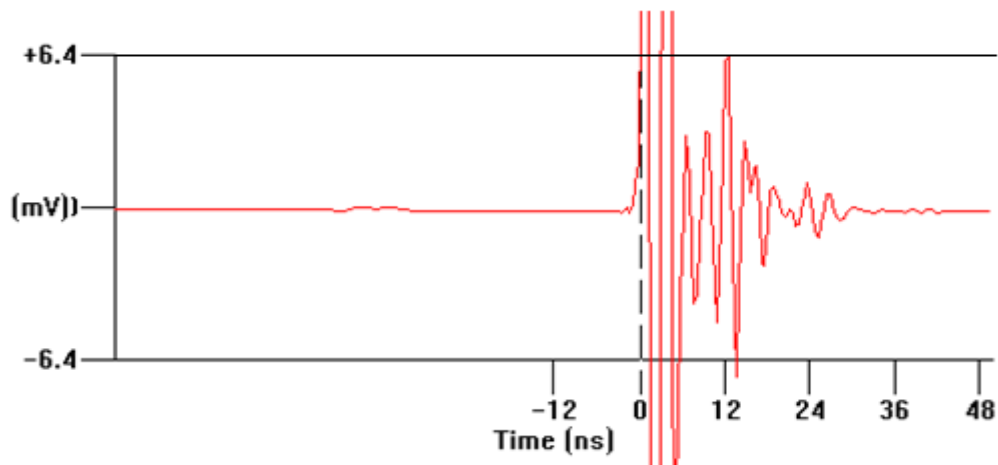
در شکل‌های ۵-۵ تا ۵-۱۳ چند نمونه رد برداشت شده از نمونه‌های مختلف به نمایش درآمده است. در این شکل‌ها با افزایش درصد رطوبت نمونه‌ها، دامنه پالس بازتابی از سطح آنها نیز افزایش می‌یابد. این امر از افزایش اختلاف ثابت دی الکتریک خاک مرطوب و هوا ناشی شده است.



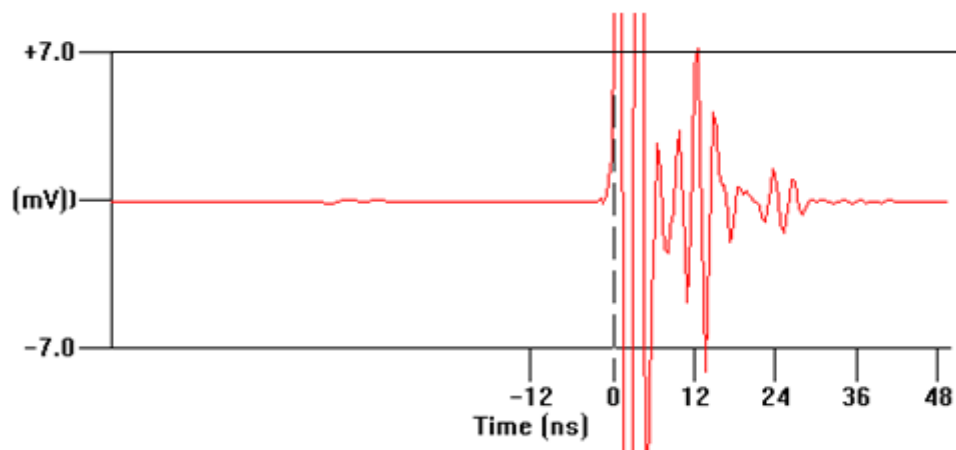
شکل ۵-۵: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی اول (خشک).



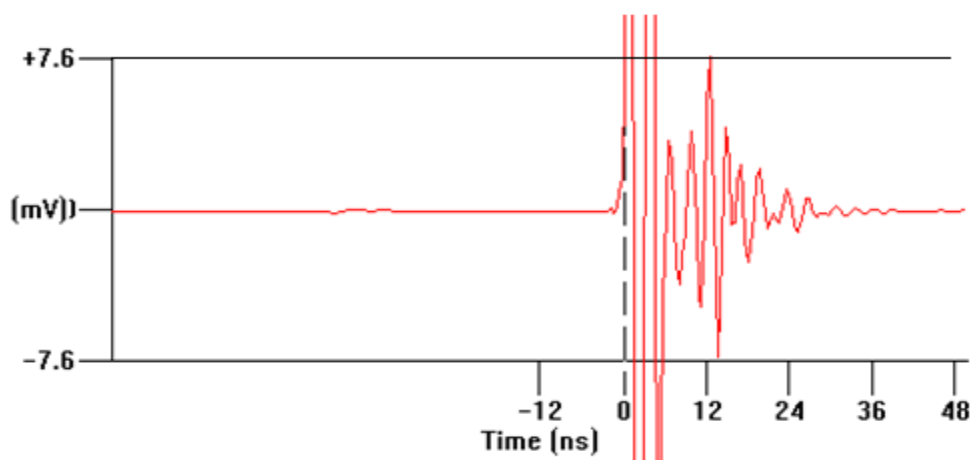
شکل ۵-۶: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی دوم.



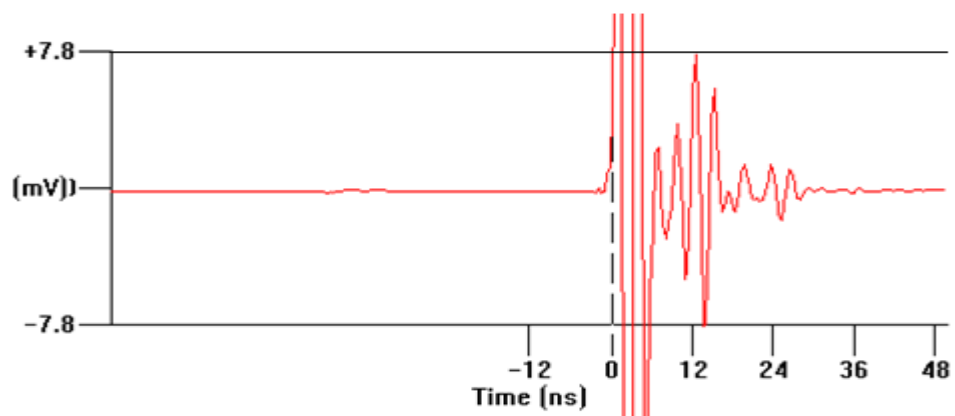
شکل ۷-۷: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی سوم.



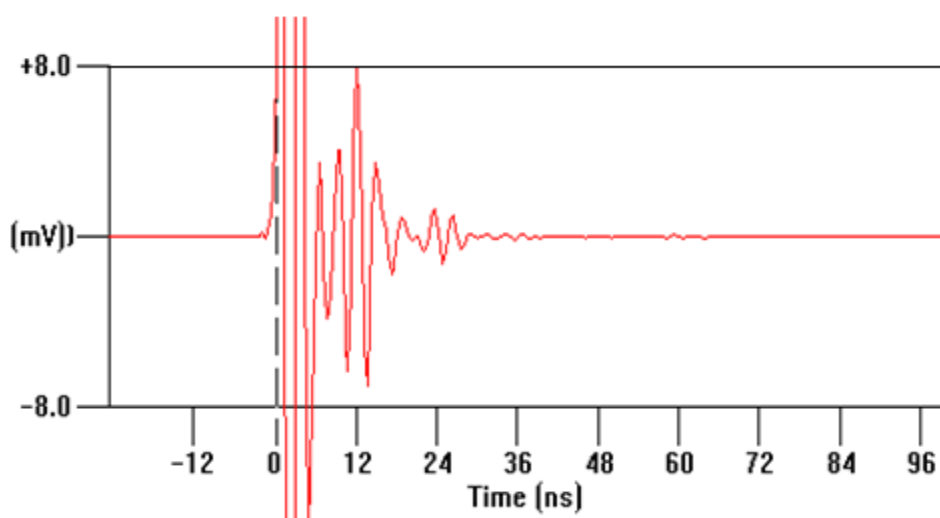
شکل ۸-۷: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی چهارم.



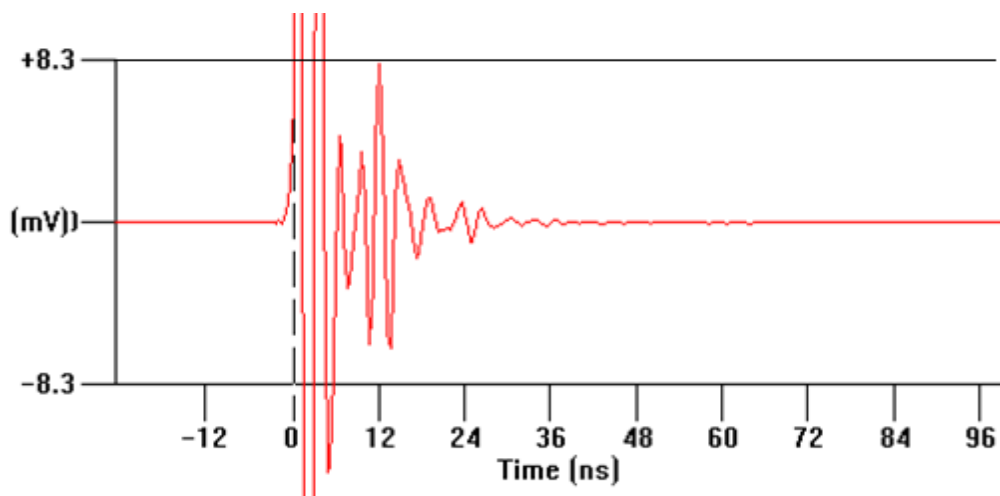
شکل ۹-۷: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی پنجم.



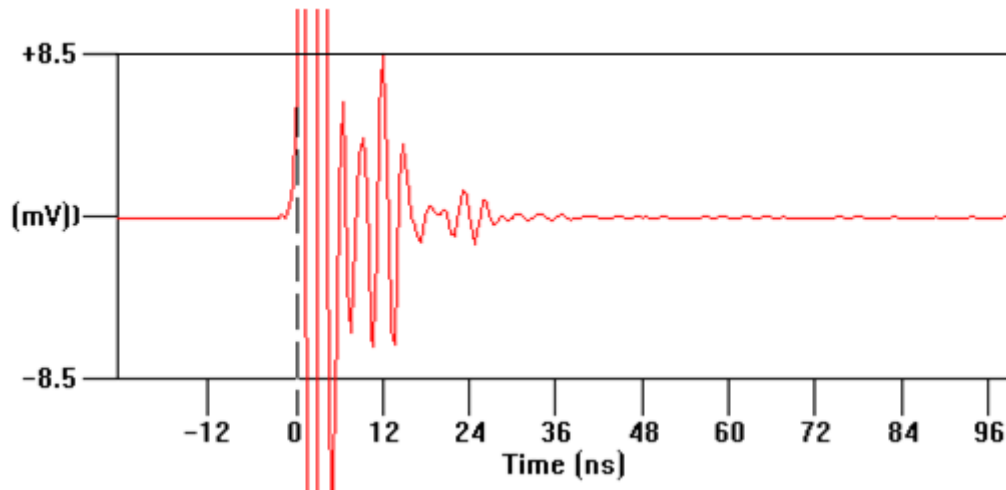
شکل ۵-۱۰: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی ششم.



شکل ۵-۱۱: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی هفتم.



شکل ۵-۱۲: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی هشتم.



شکل ۵-۱۳: پالس بازتاب شده از سطح نمونه‌ی نهم.

باید به این نکته توجه داشت که به دلیل آن که فاصله‌ی سطح بالایی نمونه اساس تا آنتن در تمامی برداشتها یکسان و برابر با ۱۳۵ سانتی‌متر است (برخلاف نمونه‌های آسفالتی در فصل پیش که ارتفاعات مختلفی داشتند)، یک مرحله برداشت از صفحه فلزی برای تمامی نمونه‌ها کافی است. نکته‌ی مهم دیگر آن که در این آزمایش نیز برای کاهش نویز و پایداری سیگنال از انباشتگی ۱۰۲۴ در برداشت داده‌ها استفاده شد.

در جدول ۳-۵ مقادیر دی‌الکتریک محاسبه شده با استفاده از معادله ۲-۳۴، برای مراحل مختلف آزمایش نمایش داده شده است.

جدول ۵-۳: محاسبه ی ثابت دی الکتریک نمونه ها از اندازه گیری های *GPR*.

مرحله انجام آزمایش	دامنه پالس انعکاسی از سطح صفحه ی فلزی (A_m)	دامنه پالس انعکاسی از سطح نمونه (A)	ثابت دی الکتریک (ϵ_r) محاسبه شده در هر مرحله
۱	۱۱/۴	۵/۴	۷/۸
۲	"	۵/۸	۹/۴
۳	"	۶/۴	۱۲/۷
۴	"	۷	۱۷/۵
۵	"	۷/۶	۲۵
۶	"	۷/۸	۲۸/۵
۷	"	۸	۳۲/۵
۸	"	۸/۳	۴۰/۴
۹	"	۸/۵	۴۷

نتایج بدست آمده در جدول بالا را می توان این گونه تحلیل کرد که به دلیل بالاتر بودن ثابت دی الکتریک آب نسبت به ثابت دی الکتریک دیگر اجزای تشکیل دهنده نمونه اساس (مصالح سنگی و حفرات هوا)، با افزایش درصد رطوبت در نمونه ها، ثابت دی الکتریک آن ها افزایش می یابد. با افزایش ثابت دی الکتریک نمونه ها، ضریب انعکاس امواج در مرز بین دو محیط هوا و نمونه اساس افزایش یافته و به دنبال آن دامنه پالس انعکاسی از سطح نمونه ها نیز افزایش می یابد.

۵-۳- تعیین درصد رطوبت نمونه ها

برای تعیین درصد رطوبت نمونه های اخذ شده در مراحل مختلف آزمایش، از روش استاندارد *ASTM-D2216* استفاده شد. در این روش ابتدا نمونه مورد نظر وزن می شود و سپس آن را به مدت ۳ ساعت داخل کوره و در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار می دهند تا کاملاً خشک شود. سپس مجدداً آن را وزن می کنند. درصد رطوبت هر یک از نمونه ها مطابق با رابطه زیر به دست می آید [۲۱].

$$\text{moisture \%} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1-5)$$

که در این رابطه W_w وزن نمونه قبل از خشک شدن و W_d وزن نمونه خشک شده است. در جدول زیر مراحل مختلف آزمایش به همراه درصد رطوبت و ثابت دی الکتریک محاسبه شده برای هر مرحله نمایش داده شده است.

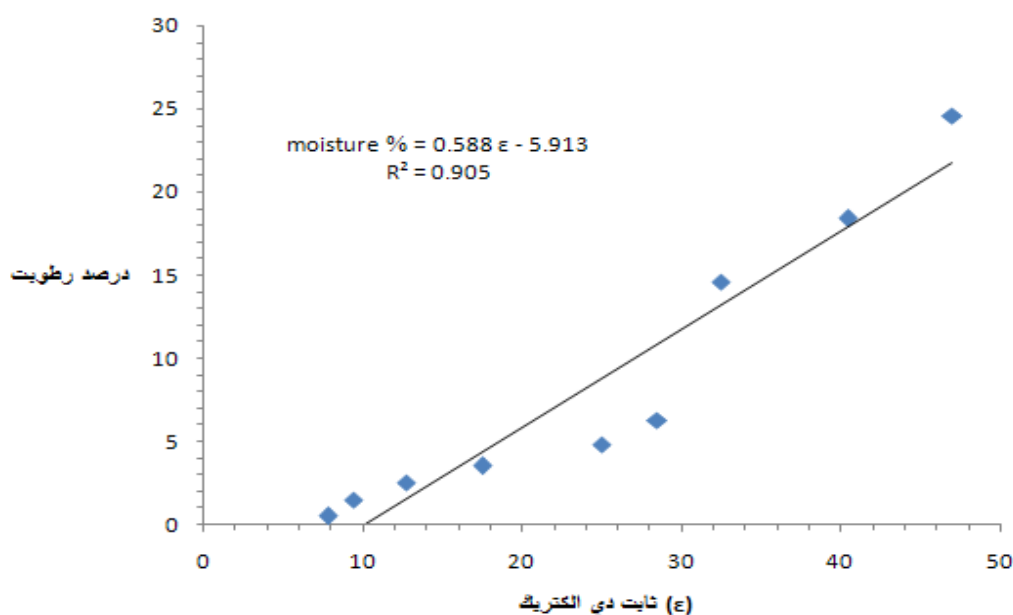
جدول ۴-۵: درصد رطوبت نمونه ها و ثابت دی الکتریک آن‌ها.

مرحله انجام آزمایش	مقدار آب افزوده شده به نمونه (CC)	درصد رطوبت نمونه	ثابت دی الکتریک محاسبه شده
۱	۰	۰/۵	۷/۸
۲	۱۳۰۰	۱/۵	۹/۴
۳	۱۳۰۰	۲/۵	۱۲/۷
۴	۱۳۰۰	۳/۵	۱۷/۵
۵	۱۷۰۰	۴/۸	۲۵
۶	۱۹۰۰	۶/۳	۲۸/۵
۷	۱۰۸۰۰	۱۴/۶	۳۲/۵
۸	۵۰۰۰	۱۸/۴	۴۰/۴
۹	۸۰۰۰	۲۴/۶	۴۷

همان‌طور که در جدول ۴-۵ ملاحظه می‌شود با افزایش درصد رطوبت نمونه‌ها، ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده برای آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.

۴-۵- رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و درصد رطوبت نمونه‌ها

برای ایجاد ارتباط بین ثابت دی‌الکتریک و درصد رطوبت اساس، این دو کمیت به ترتیب روی محورهای افقی و عمودی در شکل ۱۴-۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۴-۵: نمودار رابطه‌ی بین درصد رطوبت اساس و ثابت دی‌الکتریک آن.

همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در محدوده‌ی درصد رطوبت بین ۰ تا ۲۵ درصد، رابطه بین درصد رطوبت و ثابت دی‌الکتریک برای این نوع اساس به‌صورت خطی بدست آمده و معادله این خط به شکل زیر است:

$$\text{Moisture \%} = 0.588 \epsilon_r - 5.913 \quad (۴-۵)$$

نکته‌ی مهمی که باید به آن توجه داشت این است که در اینجا نیز همانند آزمایش‌های مربوط به آسفالت، به دلیل کوچکتر بودن سطح نمونه نسبت به سطح ردپای دستگاه در فاصله ی $1/۳۵$ متری از آن، خطاهایی در مقادیر ثابت دی‌الکتریک به دست آمده وجود دارد. بنابراین برای رسیدن به نتایج صحیح، باید سطح مقطع نمونه بزرگتر و در حد سطح ردپای آنتن مورد استفاده باشد و یا اینکه از آنتنی با فرکانس مرکزی بالاتر استفاده شود.

فصل (۶)

جمع بندی، نتیجه گیری و

پیشنهادات

به طور کلی نتایج به دست آمده از فعالیت‌های انجام شده در این پایان نامه را می‌توان به سه گروه زیر تقسیم بندی کرد.

(۱) نتایج به دست آمده از برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR در محوطه دانشگاه

صنعتی شاهرود

برداشت داده‌ها در محوطه دانشگاه با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز انجام گرفت. این داده‌ها به منظور بررسی ضخامت لایه‌های روسازی و خصوصیات کیفی آن‌ها برداشت شدند. اما همان‌طور که در فصل (۳) ملاحظه شد، تعیین ضخامت لایه آسفالت به کمک این آنتن چندان موفقیت آمیز نبود. دلایل این امر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- اولین دلیل آن است که ضخامت آسفالت در داخل محوطه دانشگاه کم بوده و گاهی تنها به ۳ تا ۴ سانتی‌متر می‌رسد. تشخیص چنین لایه‌هایی با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز که طول موج آن در زمین حدود ۴۰ سانتی‌متر است، امکان پذیر نیست.

- اصولاً در بررسی روسازی‌ها با استفاده از روش GPR، از آنتن‌هایی با فرکانس مرکزی بالاتر استفاده می‌شود. البته از این آنتن در بررسی روسازی می‌توان برای پیدا کردن حفرات زیرسطحی استفاده کرد.

- علاوه بر این روش GPR در کنترل کیفی روسازی‌ها زمانی به نتیجه دقیق می‌رسد که روسازی جدیدالاحداث باشد. چراکه در این روسازی‌ها، مرز بین لایه‌ها مشخص‌تر و ناگهانی‌تر است، بنابراین بازتاب‌های بهتری را از این مرزها خواهیم داشت. ولی در روسازی‌های قدیمی نظیر آنچه که در محوطه دانشگاه وجود دارد، این مرزها تدریجی می‌شوند و معمولاً نتایج به دست آمده با خطا همراه خواهند بود.

- نکته دیگری که باید به آن توجه داشت این است که روش مورد استفاده برای تعیین سرعت موج رادار در لایه‌های زیرسطحی (روش انطباق هذلولی)، سرعت میانگین موج رادار را در لایه‌های زیرسطح

ارائه می‌دهد نه سرعت حرکت موج در تک‌تک لایه‌ها، که این خود باعث ایجاد خطا در تعیین ضخامت لایه‌ها می‌شود. برای تعیین دقیق سرعت در لایه‌های روسازی باید از روش‌های CMP و یا بازتابش سطحی استفاده کرد.

در مورد تعیین خصوصیات کیفی لایه‌های روسازی (مانند درصد حفرات هوای آسفالت و یا درصد رطوبت خاک زیرسطحی) باید گفت که به‌طور معمول از آنتن‌های هوایی برای این منظور استفاده می‌شود. چرا که در این آنتن‌ها مشکل همپوشانی موج مستقیم با امواج بازتابی وجود ندارد. هرچند همان‌طور که در فصل (۳) نیز ملاحظه شد، بررسی دانه‌بندی و درصد رطوبت خاک از روی عمق نفوذ رادار و طیف فرکانسی سیگنال‌های دریافت شده، به‌صورت کیفی امکان‌پذیر است.

۲) نتایج به دست آمده از تعیین درصد حفرات هوای آسفالت

همان‌طور که در فصل (۴) نیز ذکر شد برای تعیین درصد حفرات هوای آسفالت از آنتن ۸۰۰ مگاهرتز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شد. اگرچه این آزمایش‌ها رابطه منطقی بین درصد حفرات آسفالت و ثابت دی‌الکتریک را نشان می‌دهد، اما همان‌طور که مشاهده شد، مقادیر دی‌الکتریک به دست آمده برای نمونه‌های استوانه‌ای خیلی بزرگتر از مقادیر واقعی ثابت دی‌الکتریک آسفالت هستند. این امر ناشی از کوچک بودن سطح مقطع نمونه‌های استوانه‌ای نسبت به سطح ردپای آنتن GPR مورد استفاده است. بنابراین لازم است که در بررسی‌های آزمایشگاهی از نمونه‌هایی با ابعاد بزرگتر و یا از آنتن‌هایی با فرکانس مرکزی بالاتر استفاده نمود.

همچنین باید توجه داشت که ضخامت نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه و یا آسفالت موجود در روسازی باید تا حدی باشد که پالس‌های بازتابی از سطح بالایی و پایینی آن‌ها با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند. اگر همپوشانی بین پاسخ‌های بازتابی زیاد باشد، تعیین خصوصیات کیفی با مشکل مواجه خواهد شد.

نکته مهم دیگری که باید به آن توجه داشت تغییرات دامنه‌ی پالس‌های بازتابی از سطح نمونه‌ها در اثر تغییرات ارتفاع آنتن (فاصله آنتن تا سطح نمونه) است. نتیجه مهمی که از این مطلب می‌توان

گرفت ضرورت اعمال تصحیح ارتفاع بر روی داده‌های واقعی است، چراکه در برداشت واقعی داده‌ها، آنتن GPR به یک اتومبیل مسقف⁷¹ متصل می‌شود. حرکت اتومبیل، به‌خصوص در سرعت‌های زیاد، باعث نوسان آنتن و در نتیجه تغییر در ارتفاع آن از سطح زمین می‌شود. در این حالت ارتفاع آنتن از سطح زمین را می‌توان به کمک اختلاف زمانی بین پالس بازتاب سطحی و پالس مستقیم به دست آورد و با اعمال تصحیح ارتفاع، تغییرات دامنه پالس بازتابی را اصلاح کرد.

۳) نتایج به دست آمده از تعیین درصد رطوبت اساس

بررسی نمونه‌های خاک اساس با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز، با مشکلاتی مشابه با مشکلات بررسی نمونه‌های آسفالتی مواجه شد. اما میزان خطاها نسبت به نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های آسفالتی کمتر بود.

در هر دو مورد بررسی کیفی آسفالت و اساس، باید ردها با انباشتگی بالا برداشت شوند. در غیر این صورت باید از تعداد زیادی از دامنه پالس‌های بازتاب شده از یک نمونه میانگین‌گیری نمود و از مقدار میانگین برای تعیین ثابت دی‌الکتریک نمونه‌ها استفاده کرد.

همچنین باید توجه داشت که به‌هنگام تعیین درصد رطوبت اساس در روسازی‌های واقعی، تضعیف پالس‌های GPR در لایه آسفالتی نادیده در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی که میزان تضعیف پالس‌های رادار توسط لایه آسفالت واقعاً صفر نیست و این خود باعث ایجاد خطا در تعیین درصد رطوبت اساس می‌شود. بنابراین، بررسی میزان تضعیف پالس‌ها در آسفالت‌هایی با درجات تراکم مختلف و اعمال تغییرات در نحوه‌ی محاسبه ثابت دی‌الکتریک اساس، می‌تواند زمینه‌ای برای انجام تحقیقات آتی باشد.

به‌طور کلی روش **GPR** از قابلیت‌های بالایی برای کنترل روسازی‌ها برخوردار است. نتایج مطلوب به خصوص زمانی به دست می‌آیند که از دو آنتن با فرکانس‌های مرکزی مختلف برای بررسی‌های زیر

⁷¹ Van

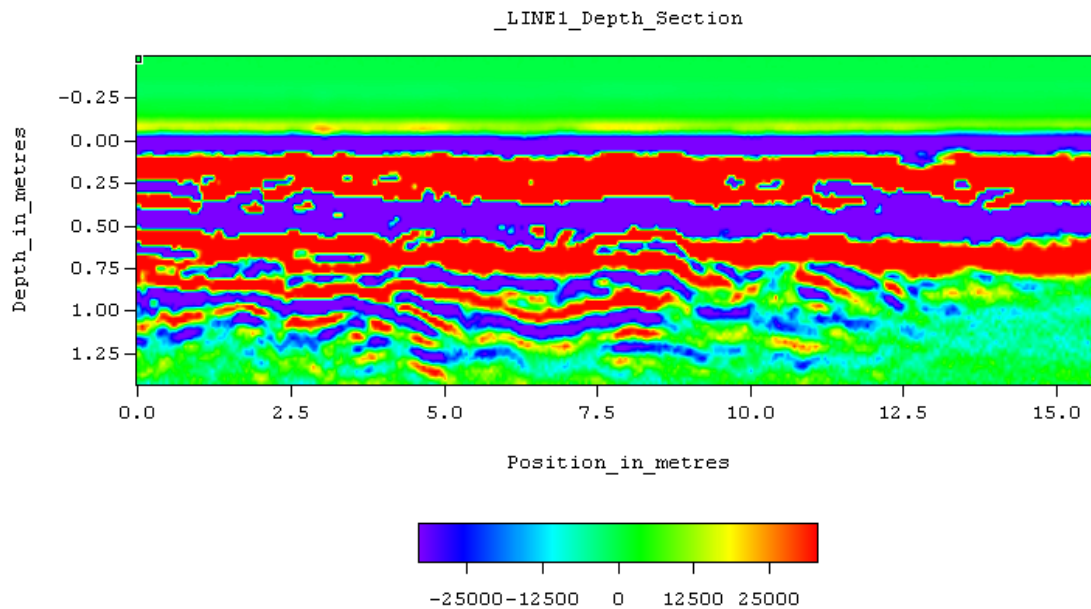
سطحی استفاده شود. در این حالت یک آنتن هوایی با فرکانس مرکزی بالا برای بررسی لایه‌های
روسازی و یک آنتن زمینی با فرکانس مرکزی پایین‌تر برای بررسی‌های عمیق‌تر استفاده می‌شوند.

پیوست

پیوست الف - بررسی تعداد دیگری از مقاطع عمقی

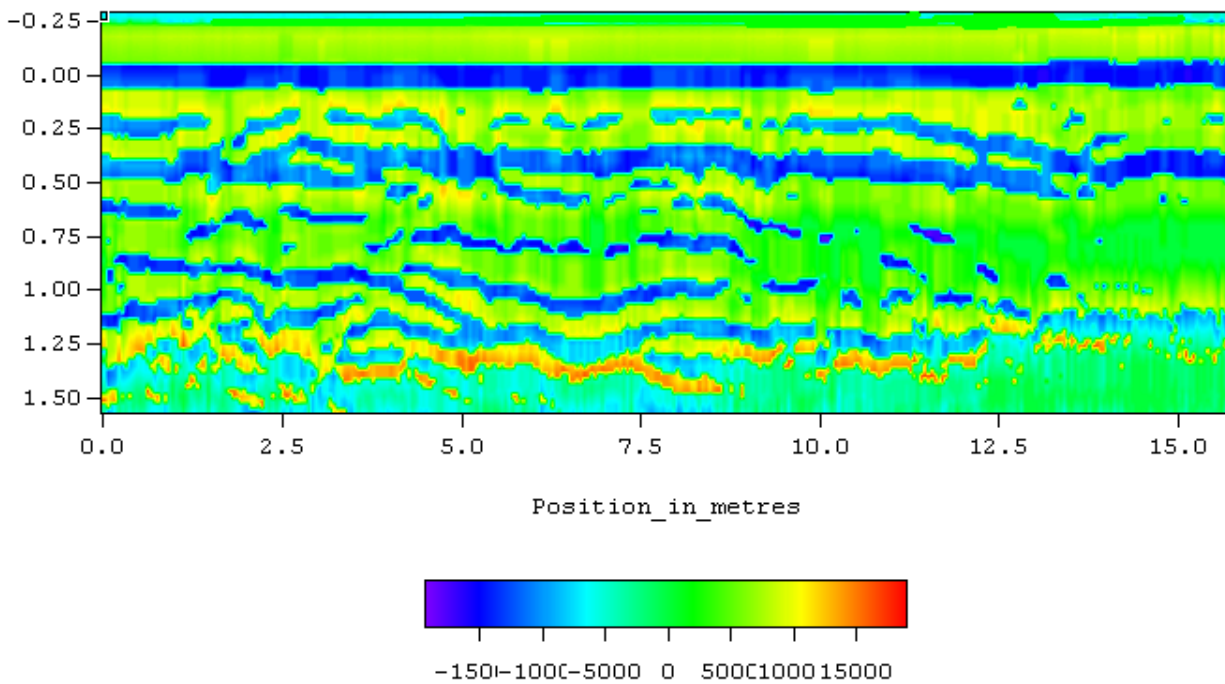
در این بخش مقطع عمقی تعداد دیگری از پروفیل‌ها، که در آنها عمل مغزه‌گیری یا چاهک‌زنی انجام نشده است، نمایش داده می‌شود. برای هر یک از پروفیل‌ها دو مقطع عمقی ارائه شده است. در مقطع اول پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC* بر روی داده‌های آن مقطع اعمال شده است. مقطع دوم اثر اعمال پردازش واهمامیخت را روی داده‌های همان مقطع نمایش می‌دهد.

۱- مقطع عمقی شماره ۱:



شکل الف- ۱: مقطع عمقی شماره ۱ بعد از اعمال پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

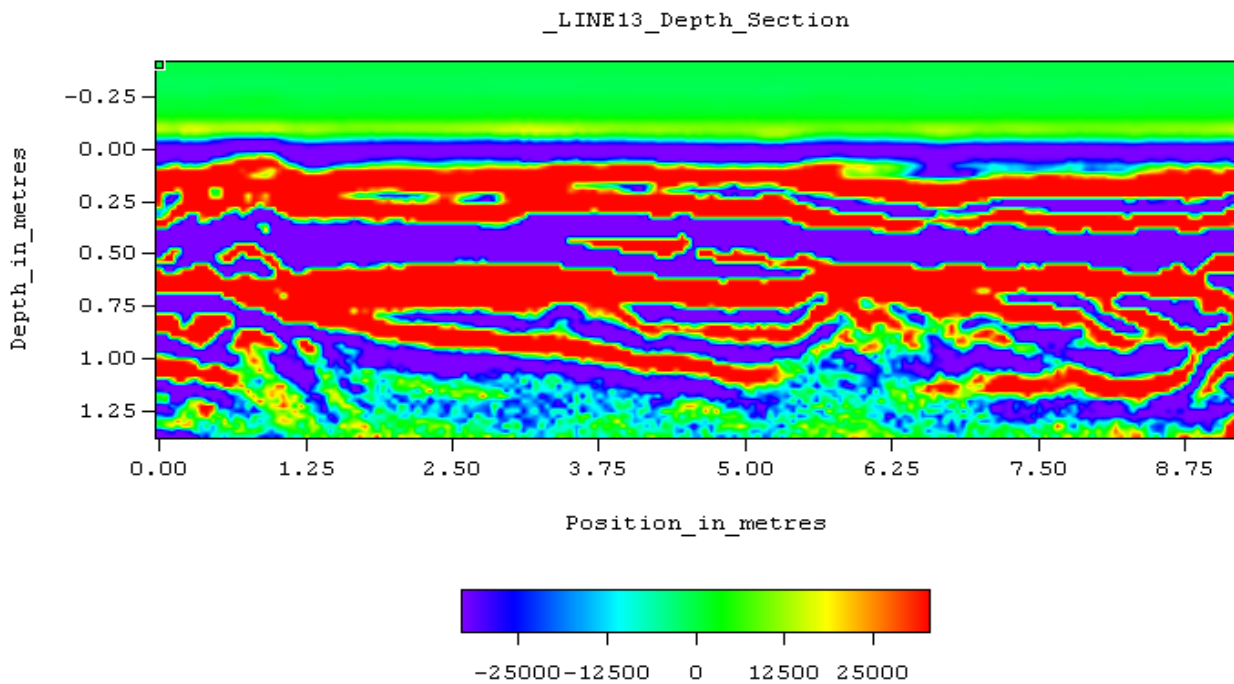
_LINE1_Depth_Section



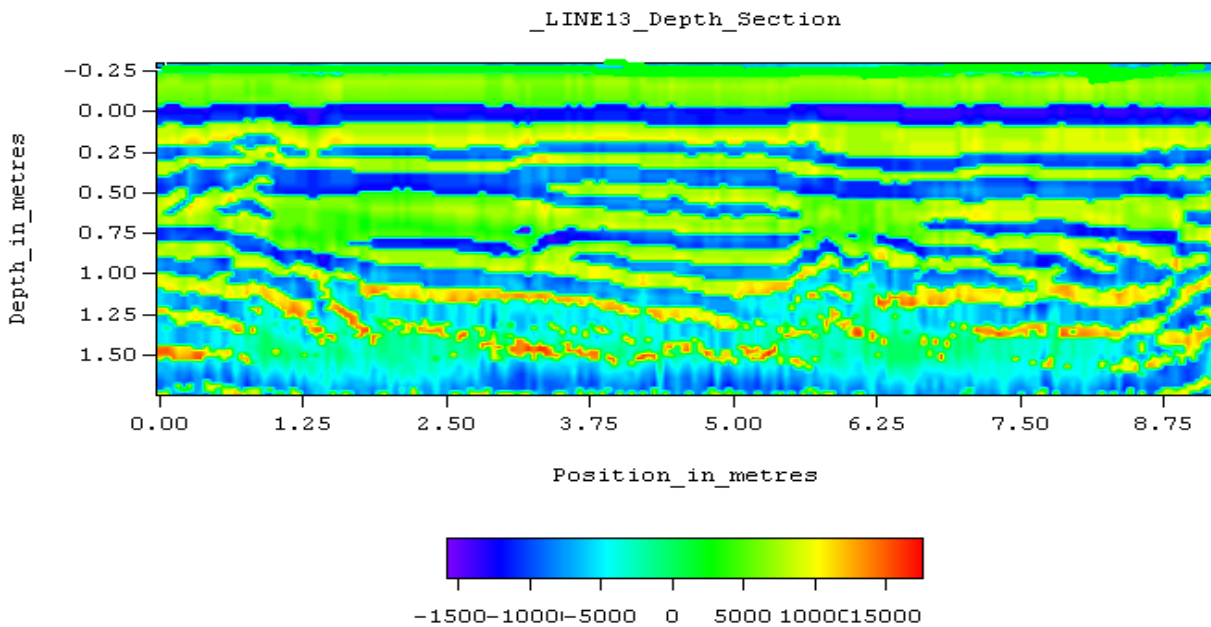
شکل الف- ۲: مقطع عمقی شماره ۱ بعد از اعمال پردازش واهمامیخت.

چنان که در شکل‌های بالا ملاحظه می‌شود در هر دو مقطع عمقی، یک بازتابش در عمق ۴۰ سانتی-متری وجود دارد که می‌توان آن را به مرز احتمالی بین خاک دستی و بکر نسبت داد. بازتابش از مرز زیرین آسفالت در این مقطع قابل تشخیص نیست.

۲- مقطع عمقی شماره ۱۳



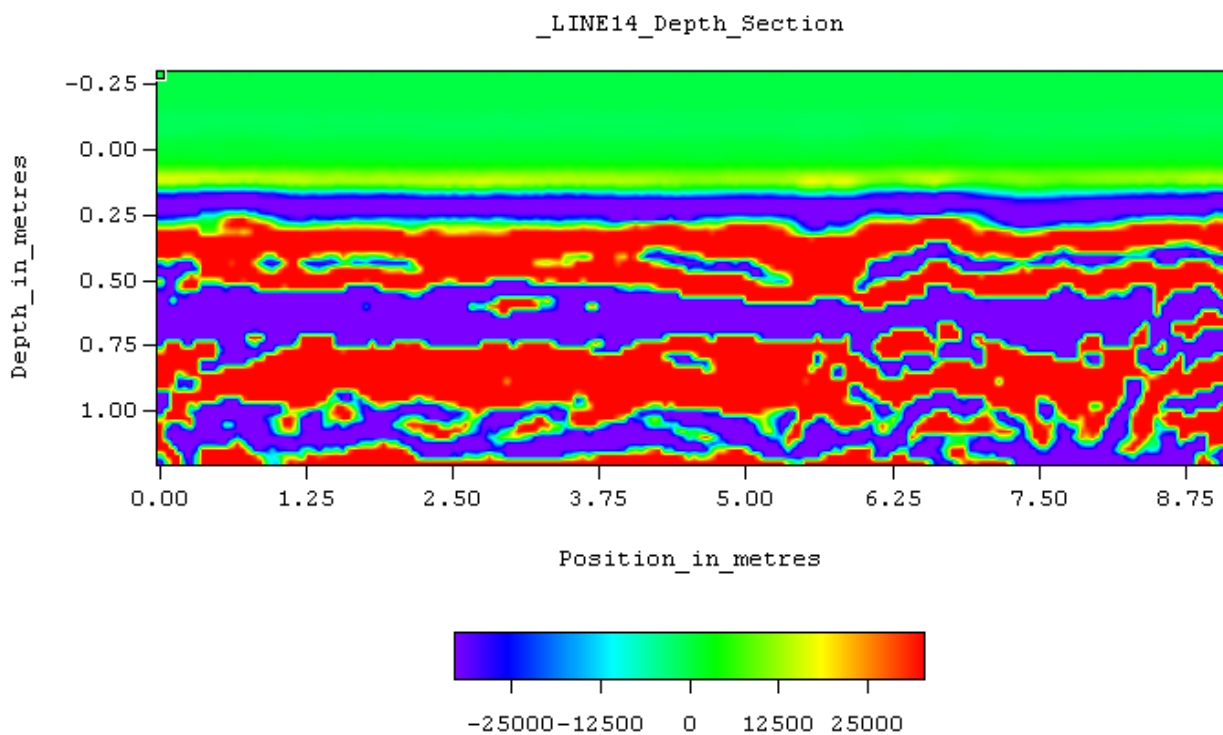
شکل الف-۳: مقطع عمقی شماره ۱۳ بعد از پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*



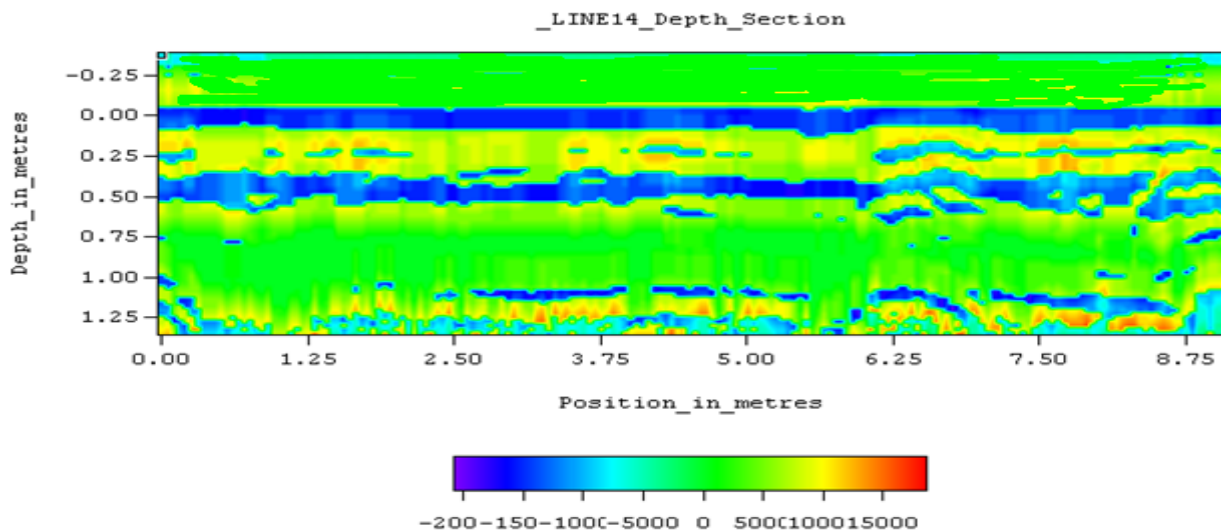
شکل الف-۴: مقطع عمقی شماره ۱۳ بعد از پردازش واهمامیخت.

در مقطع بالا نیز بازتابش موجود در عمق ۲۵ سانتی متری در سمت چپ و ۳۵ سانتی متری در سمت راست، مرز احتمالی بین خاک دستی و بکر را نمایش می دهد.

۳) مقطع عمقی شماره ۱۴



شکل الف-۵: مقطع عمقی شماره ۱۴ بعد از پردازش های *DEWOW* و بهره *SEC*.

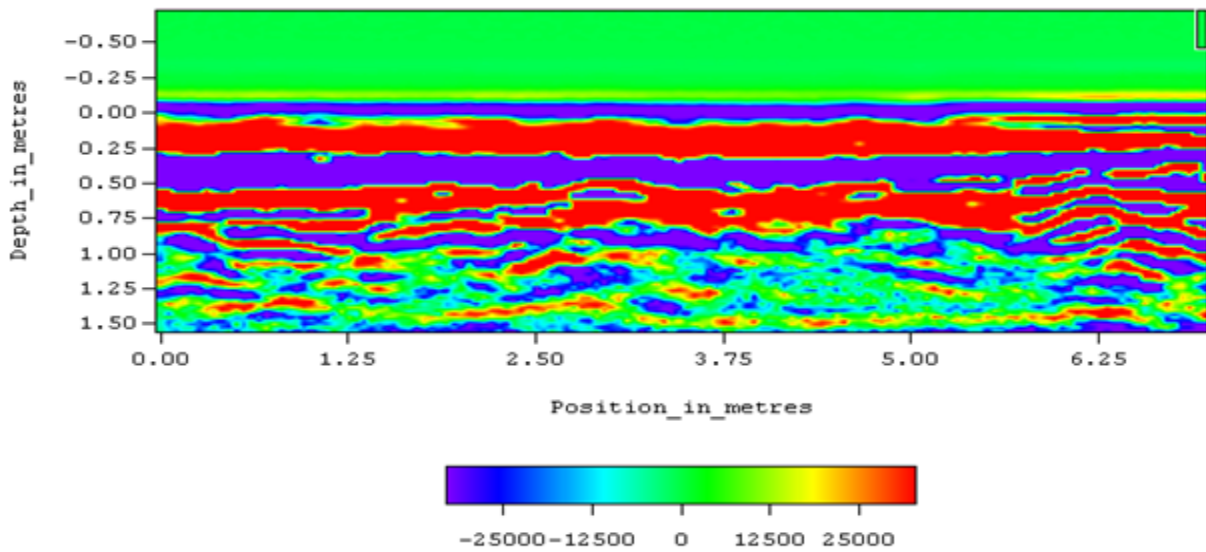


شکل الف-۵: مقطع عمقی شماره ۱۴ بعد از پردازش واهمامیخت.

همان طور که در شکل های بالا ملاحظه می شود، پالس بازتابی مشخصی را از سطح زیرین آسفالت نمی توان تشخیص داد. پالس بازتابی از عمق ۴۰ سانتی متری مرز احتمالی بین خاک دستی و بکر را نمایش می دهد.

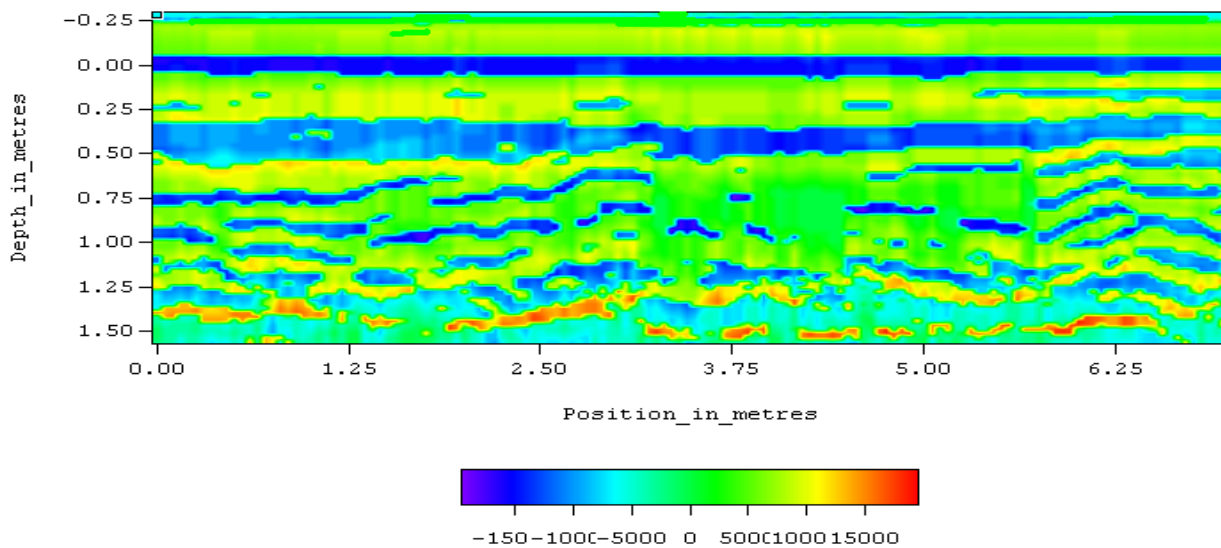
۳- مقطع عمقی شماره ۲۹

_Line 29_Depth_Section



شکل الف-۶: مقطع عمقی شماره ۲۹ بعد از پردازش‌های *DEWOW* و بهره *SEC*.

_Line 29_Depth_Section



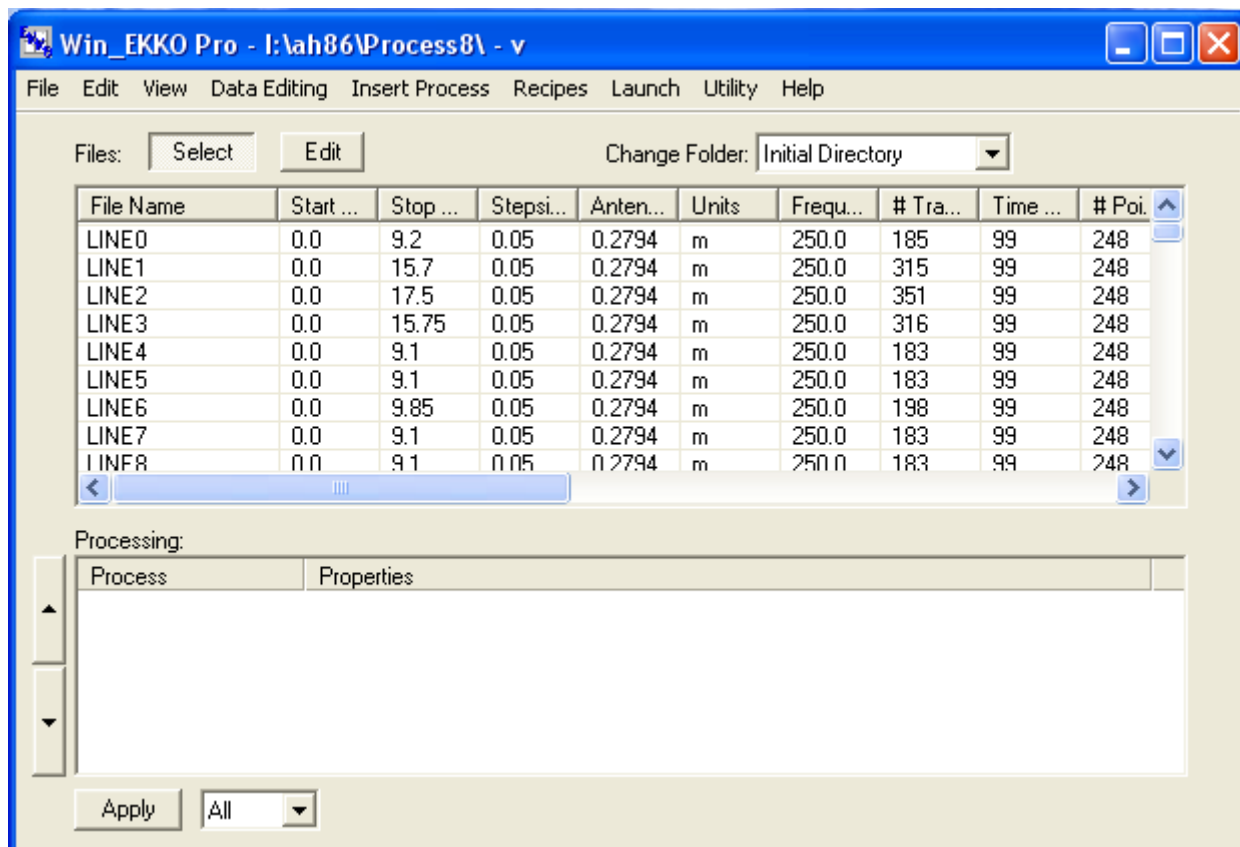
شکل الف-۷: مقطع عمقی شماره ۲۹ بعد از پردازش واهمامیخت.

در مقاطع بالا نیز انعکاس واقع شده در عمق ۴۰ سانتی متری مرز بین خاک دستی و بکر را نمایش می دهد.

پیوست ب- معرفی نرم افزار *Win-Ekko pro*

این نرم افزار توسط شرکت *sensors & software* کشور کانادا برای ویرایش، پردازش و نمایش داده های *GPR* تولید شده است.

در شکل ب-۱ صفحه اصلی این نرم افزار نمایش داده شده است.



شکل ب-۱: صفحه اصلی نرم افزار *Win-Ekko pro*.

همانطور که در شکل ب-۱ دیده می‌شود، این نرم افزار از یک جدول برای نمایش مشخصات داده‌های **GPR** استفاده می‌کند. برای باز کردن یک پروژه **GPR**، از گزینه‌های **new project** یا **open project** در منوی **File** استفاده می‌شود.

با انتخاب این گزینه‌ها، پروفیل‌های برداشت شده **GPR** به ترتیب در ردیف‌های جدول این نرم افزار ظاهر می‌شوند. برای هر یک از این پروفیل‌ها مشخصاتی مانند نام فایل، موقعیت ابتدا و انتهای پروفیل، فواصل ایستگاهی، فاصله آنتن‌ها، واحد اندازه‌گیری فواصل، فرکانس مرکزی دستگاه، تعداد ردهای برداشتی نمایش داده شده است. قابلیت نمایش یا عدم نمایش هر یک از این موارد ذکر شده را می‌توان به کمک منوی **Edit** تنظیم کرد. همچنین از طریق این منو و با انتخاب گزینه **preference** می‌توان مقاطع زمانی را به مقاطع عمقی تبدیل کرد. از دیگر گزینه‌های موجود در این منو، می‌توان به گزینه‌های **Reset** و **Delete** اشاره کرد. گزینه **Reset** فایل داده‌ها را بعد از اعمال پردازش‌های مختلف، دوباره به حالت اولیه و به شکل قبل از اعمال پردازش برمی‌گرداند. گزینه **Delete** نیز برای حذف فایل داده‌ها استفاده می‌شود. منوی **View** برای نمایش مقاطع عمقی و زمانی و نیز نمایش مجزای ردهای برداشت شده در طول یک پروفیل استفاده می‌شود.

همچنین در این منو، گزینه‌هایی چون میانگین طیف فرکانس و میانگین دامنه برحسب زمان برای ردهای برداشت شده در طول یک پروفیل وجود دارد.

منوی **Data Editing** شامل گزینه‌های زیادی است که از جمله آنها می‌توان به گزینه‌های **Merge, Convert y** و..... اشاره کرد.

گزینه **Merge** برای ترکیب داده‌های حاصل از دو یا تعداد بیشتری فایل به یک فایل مجزا منفرد استفاده می‌شود.

گزینه **Convert** برای تبدیل فایل داده‌های **sensors & software** به دیگر فرمت‌ها نظیر **SEG-Y**، **ASCII**، **ASCII2** استفاده می‌شود.

گزینه *Add topography* به منظور اضافه کردن داده‌های توپوگرافی به داده‌های *GPR* استفاده می‌شود و گزینه *Shift topography* برای جبران توپوگرافی (پستی و بلندی‌ها) قبل از ترسیم مقاطع رادار استفاده می‌شود.

منوی *Insert process* برای اعمال پردازش‌های مختلف بر روی فایل داده‌ها منظور شده است. پردازش‌های مورد استفاده بر روی داده‌های *GPR* وسیع است، بطوری‌که پرداختن به آن‌ها در این مجال کوتاه ممکن نیست.

در اینجا فقط به توضیح مختصری در مورد برخی از آنها پرداخته می‌شود.

اولین گزینه پردازش، پردازش بهره است که انواع آن عبارتند از *AGC* و *SEC* و *Auto gain* و *Constant* است و برای جبران تضعیف سیگنال‌های عمیق استفاده می‌شوند.

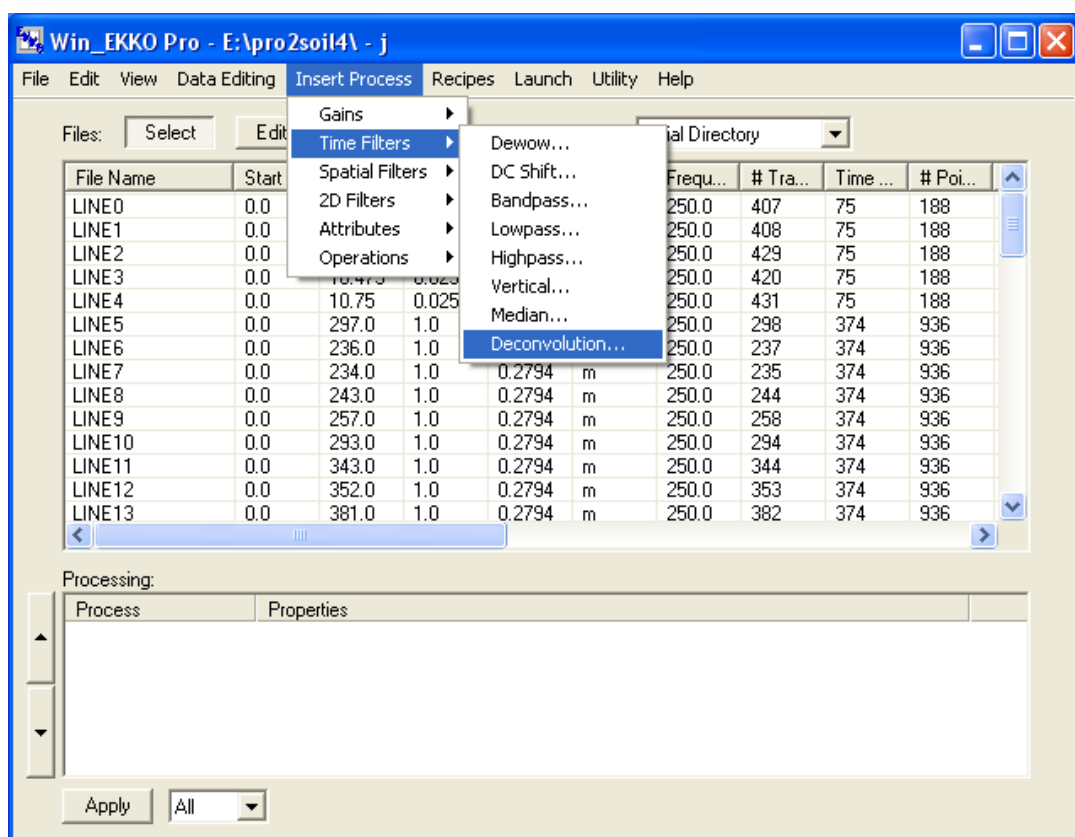
دومین گزینه پردازش، فیلترهای زمانی^{۷۲} هستند. این فیلترهای تنها بر روی یک رد و در طول محور زمان عمل می‌کنند. برخی از انواع آن عبارتند از فیلترهای *DEWOW*، برداشت جریان مستقیم^{۷۳}، فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر و پهناگذر^{۷۴}، واهمامیخت و فیلتر عمودی^{۷۵}. برای اعمال پردازش واهمامیخت از منوی *Insert Process* در صفحه اصلی نرم‌افزار، گزینه فیلترهای زمانی را انتخاب می‌کنیم. با انتخاب این گزینه مطابق با شکل ب-۲ انواع مختلف فیلترهای زمانی را می‌توان مشاهده کرد. پردازش واهمامیخت آخرین گزینه در بین این فیلترهاست.

⁷² Time filters

⁷³ DC Shift

⁷⁴ High pass, Low pass and Band pass Filter

⁷⁵ Vertical Filter



شکل ب-۲: نحوه‌ی انتخاب پردازش واهمامیخت در نرم‌افزار *Win-Ekko pro*.

برای اعمال این پردازش بر روی گزینه *Deconvolution* کلیک می‌کنیم. بعد از انتخاب این گزینه صفحه تنظیمات این پردازش مطابق با شکل ب-۳ ظاهر می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای وارد کردن این پردازش شامل: فرکانس، پهنای فیلتر^{۷۶}، تأخیر زمانی^{۷۷}، پهنای اسپایک^{۷۸} و سفید شدگی^{۷۹} است. برای وارد کردن پارامترهای مورد نیاز می‌توان از راهنمای نرم‌افزار کمک گرفت. طبق دستورالعمل موجود در راهنمای این نرم افزار، گزینه فرکانس برابر با فرکانس آنتن مورد استفاده است. بنابراین باتوجه به اینکه فرکانس آنتن مورد استفاده در بررسی‌های روسازی محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود برابر با ۲۵۰ مگاهرتز بود، مقدار ۲۵۰ برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود. پهنای فیلتر

⁷⁶ Filter Width

⁷⁷ Delay

⁷⁸ Spike Width

⁷⁹ Whitening

بعد از وارد کردن پارامترهای مورد نیاز گزینه **OK** را انتخاب می‌کنیم. در انتها با انتخاب گزینه

Apply در صفحه اصلی نرم‌افزار این پردازش بر روی داده‌ها اعمال می‌شود.

گزینه سوم فیلترهای مکانی^{۸۰} هستند. این فیلترها از ردهای مجاور هم برای فیلتر کردن استفاده می‌کنند. از این نوع فیلترها نیز می‌توان به فیلترهای پایین گذر، بالاگذر، پهناگذر و فیلتر افقی^{۸۱} اشاره کرد.

گزینه چهارم این منو، فیلترهای دو بعدی هستند که شامل پردازش مهاجرت^{۸۲} و فیلتر عمیق^{۸۳} است. این دو پردازش به ترتیب برای از بین بردن پاسخهای هذلولی انعکاس دهنده ها و افزایش وقایع افقی استفاده می‌شوند.

گزینه پنجم مشخصه‌ها^{۸۴} هستند که شامل سه نوع دامنه آنی، فاز آنی و فرکانس آنی^{۸۵} می‌باشند.

همچنین بعد از پردازش و ویرایش داده‌های **GPR** می‌توان آنها را از طریق منوی **LAUNCH** در دیگر نرم افزارهای شرکت **Sensors & Software** مانند **EKKO-Pointer**، **EKKO- Mapper** و **EKKO- 3D** نمایش داد.

بیوست ج- معرفی نرم افزار **TRANSFORM**

از این نرم افزار برای نمایش گرافیکی داده استفاده می‌شود. این نرم افزار به منظور نمایش و تجزیه و تحلیل دو بعدی داده‌ها با دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به صورت نقشه‌های مختلف، طراحی شده است. برای مثال در مقاطع عمقی داده‌های **GPR**، فواصل ایستگاهی و عمقی متغیر مستقل و دامنه سیگنال **GPR** متغیر وابسته می‌باشد.

توسط این نرم افزار می‌توان داده‌ها را به صورت یکی از هفت نمایش گرافیکی زیر نمایش داده و به تحلیل آنها پرداخت.

⁸⁰ Spatial Filter

⁸¹ Horizontal Filter

⁸² Migration

⁸³ Deep Filter

⁸⁴ Attributes

⁸⁵ Instantaneous amplitude, Instantaneous phase, instantaneous frequency

۱. تصاویر پیکسلی
۲. تصاویر درون یابی شده
۳. نمودارهای خطی
۴. نقشه‌های کانتوری
۵. نقشه‌های سطحی
۶. نمودارهای هیستوگرام
۷. نقشه‌های برداری

خلاصه‌ای از مهمترین قابلیت‌های این نرم افزار شامل موارد زیر است:

- نمایش مؤلفه‌های دو بعدی
- ایجاد انواع تصاویر، نقشه‌ها و نمودارها
- قرار دادن هر یک از نقشه‌های تولید شده بر روی نقشه‌های دیگر
- درون یابی و جایگذاری نقاط فراموش شده در یک سری از داده‌ها
- دسترسی و نمایش مقادیر پارامترهای مورد نظر در نقاط مختلف نقشه

در صورتی که این نرم افزار در مسیر پیش فرض آن در حافظه کامپیوتر نصب شود داده‌های موجود در نرم افزار **Win-Ekko-Pro** بصورت اتوماتیک به این نرم افزار منتقل می‌شود و نقشه‌های درون یابی شده در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

- [1]. Annan. A.P, (2001), "Ground penetrating radar, work shop notes", Sensors and *Software, Canada*.
- [2]. Al-Qadi. I. (2009), " HMA density estimation from ground penetrating radar" Faculty of Polytechnic of Virginia University.
- [3]. Saarenketo .T,(2006), " Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys", faculty of science of university of Oulu, Finland.
- [4]. Neal. A. (2003), "Ground penetrating radar and its use in sedimentology. principles , problems and progress" . School of Applied Sciences, University of Wolverhampton.
- [5]. ریتس .جان. ر، میلفورد . فردریک . ج، کریستی . رابرت .و. ترجمه جمشیدی. م. (۱۳۷۰) "مبانی نظریه الکترومغناطیس" ، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- [6]. MALA Geosience manual .Theoretical basis of GPR technology
- [7]. Reynolds .J.M,(1997), " An Introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley.
- [۸]. محمدی ویژه م، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: " برداشت، پردازش و تفسیر داده های **GPR** در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با روش ژئوالکتریک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت، ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [9]. Scullion. T , Saarenketo. T . (2001) , "Use of ground penetrating radar for site investigation of low volume road ways and design recommendation". Texas Transportation Institute.
- [10]. Saarenketo .T , (2004), " Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping ". Road Scanners, Rovaniemi, Finland.

- [11]. C.Berthelot , T. Scullion , L. Safronetz, (2005), ‘’ Application of ground penetrating radar for cold in-place road’’, j, of, Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers.
- [12]. Sensors and Software, (1999),’’Win-Ekko user’s guide. version 1’’.
- [13]. Scullion. T , Chen.L . (2002), ‘’Using ground penetrating radar for real-time quality control measurements on new HMA’’. Sponsored by Texas Department of Transportation in cooperation with the US Department of Transportation.
- [14]. Scullion. T , Saarenketo. T . (2001) ,’’Use of ground penetrating radar for site investigation of low volume road ways and design recommendation’’. Texas Transportation Institute.
- [15]. Cherif.A, majidzadeh. T,(2006), ‘’ Use of ground penetrating radar for quality control measurments of new asphalt overlays’’, Resource International Inc, Columbus, Ohio, USA.
- [16]. Metvaly .M , Ismail. A , Matsushima. J .(2004),’’Evaluating some factors that affect feasillity using ground penetrating radar for landmine detection’’ .j, of applied geophysics, 123,p12.
- [17]. Thomas A.M , Rogers. C. D , Champman. D.N. (2002), ‘’Soil electromagnetic mapping for enhanced GPR utility location’’. University of Birmingham, Birmingham, UK.
- [18]. A.L.Vandom , Borchers . B, Hendrickx .J. (2003),’’ Methods for prediction of soil dielectric properties ‘’.Dept.E&Es, New Mexico Tech. 801 Leroy Place Socorro, USA.
- [19]. Yelf. R , Yelf. D, (2002), ‘’Where is time zero?’’Georadar Research Pty, Ltd.Report21
- [20]. Sensors and Software, (1999),’’Noggin user’s manual’’.

[۲۱] افلاکی ا، (۱۳۸۷)، " آزمایش های مکانیک خاک "، جلد اول، چاپ سوم، انتشارات پرهام، تهران

[۲۲] آیین نامه ۱۰۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (۱۳۸۲).

Abstract

GPR, Ground Penetrating Radar is one of the geophysical methods for natural and artificial subsurface investigations. In this method a transmitter antenna send a electromagnetic pulse to the ground and structures. These pulses are reflected by electrical inhomogenities and then received by a receiver antenna.

One of the effective applications of this method is quality control of pavements. Primary aim of using this method in pavements is determination of thickness of layers. Also it is possible determining quality properties of pavements by this method.

In a part of this study, GPR method is used for determining thickness of layers pavement in campus of Shahrood University of Technology. Determination of thickness layers of pavement was not successful, because center frequency of system was low.

In the other part of this study, GPR method is used for determining of asphalt and base quality properties. For this purpose, asphalt and base samples are produced and then void content of asphalt and moisture of base is determined by GPR. In this method, dielectric constants of asphalt and base samples is determined by surface reflection method. Then, dielectric constants are related to void content of asphalt and moisture of base. Because cross section of asphalt and base samples are smaller than footprint of GPR, dielectric constant of these samples is bigger than their real values. However, there is a logical relationship between dielectric constant and quality properties of pavement.

Key words : Ground penetrating radar, pavement, asphalt, base, void content, moisture content.