بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوالکتریک

بررسی درزه و شکستگی‌های معدن سنگ تزیینی تراورتن با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه آستانه دامغان

نگارنده: **هادی محمدی پیرنیا**

اساتید راهنما

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۹۷/۳۰۶۷/۹۶م
تاریخ: ۹۷/۷/۱۱

باسمه‌تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای هادی محمدی پیرنیا با شماره دانشجویی ۹۴۱۶۰۹۴ رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک تحت عنوان **بررسی درزه و شکستگی‌های معدن سنگ تزیینی تراورتن با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه آستانه دامغان** که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی ...) ☒ **مردود** ☐

نوع تحقیق: **نظری** ☒ **عملی** ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۲- استادراهنمای دوم	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد رداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	حمید آقاجانی	دانشیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	علی نجاتی کلاته	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد عطائی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به

اسوه‌ی زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم،

آن که در جوارش قلبم آرام می‌گرفت، روحم لطیف می‌گشت و لحظات ناب زیارتش اندیشه‌ام را زلال می‌ساخت...

مادر عزیزم

که هرچه آموختم در مکتب عشق تو آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بیکران مهربانیت را نتوانم گفت...

و تقدیم به برادر و خواهران عزیزم

که با هم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلبم لبریز عشق به شماست و خوشبختی‌تان منتهای آرزویم.

تعهد نامه

این‌جانب **هادی محمدی پیرنیا** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **ژئوفیزیک- ژئوالکتریک** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **بررسی درزه و شکستگی‌های معدن سنگ تزیینی تراورتن با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه آستانه دامغان** تحت راهنمایی آقای دکتر علیرضا عرب امیری و آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technolgy » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

چکیده

روش رادار نفوذی به زمین[1] (GPR) یک روش الکترومغناطیسی باقدرت تفکیک بالااست که برای بررسی ساختارهای زیرسطحی کم‌عمق ازجمله گسلش، چینه‌شناسی رسوبات، آشکارسازی حفرات، بررسی شکستگی‌ها در سنگ‌های تزیینی، آشکارسازی اجسام مدفون در باستان‌شناسی و ... به‌کاربرده می‌شود. بررسی سنگ‌ها با استفاده از روش GPR قطعاً یک روش جدید نیست، زیرا اولین مطالعات تاریخی به دهه هفتاد برمی‌گردد. بااین‌حال، تنها در دهه گذشته فعالیت‌های وسیع تحقیقاتی برای بررسی سنگ‌ها آغاز شده است. روش GPR یک روش تحقیق سریع و مناسب برای ارزیابی سنگ طبیعی است، اما ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی سنگ باید از قبل برای کمک به تفسیر نتایج بررسی‌شوند. هدف از این پژوهش بررسی درزه و شکستگی‌های موجود در بلوک‌های سنگ تزیینی تراورتن با استفاده از روش GPR می‌باشد. در این پژوهش، پس از مطالعات اولیه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی مورد نظر در معدن تراورتن محدوده‌ی چشمه علی، در شمال غربی شهر دامغان، برای بررسی شکستگی‌های موجود در بلوک‌های سنگ ساختمانی موردنظر با استفاده از روش GPR، تعداد ۵ پروفیل با طول‌های متفاوت که ۳ پروفیل آن بر روی بالای دیوار سینه کار که نیمرخ ان کاملا مشخص بود، برداشت صورت گرفت. و ۲ پروفیل دیگر هم بر روی سطح سنگ ساختمانی فاقد سینه کار برداشت گردید. این برداشت‌ها با استفاده از دستگاه GSSI با آنتن فرستنده پوششی دارای فرکانس مرکزی ۳۰۰ مگاهرتزی انجام شد. پس از برداشت داده‌های GPR، پردازش بر روی داده‌ها با استفاده از فیلترها و روش‌های مختلف پردازش بر روی داده‌های مذکور صورت گرفت. لازم به ذکر است که پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Reflexw انجام شده است. سپس تفسیر مقاطع GPR پردازش شده با استفاده از شواهد زمینی یا صحرایی و اطلاعات موجود دیگر انجام شد. نتایج پردازش و تفسیر داده‌ها حاکی از آن است که از روش GPR می‌توان برای تشخیص و شناسایی شکستگی‌ها و حفرات موجود در

[1] Groud Penetrating Radar

سنگ و ویژگی‌های آن مانند جهت و شیب را در اعماق کم زیر سطحی استفاده کرد.

کلید واژه: درزه و شکستگی، رادار نفوذ به زمین (GPR)، معدن سنگ تزیینی تراورتن، چشمه علی، دامغان

فهرست مطالب

۱- فصل اول ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده ۲
۱-۳- ضرورت انجام و اهداف تحقیق حاضر ۴
۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۵
۲- فصل دوم ۷
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- اصول انتشار امواج الکترومغناطیسی ۱۰
۲-۳- انتشار امواج GPR در درون زمین ۱۲
۲-۴- گذردهی الکتریکی ۱۳
۲-۵- رسانندگی الکتریکی ۱۵
۲-۶- تراوایی مغناطیسی ۱۶
۲-۷- بازتاب و عبور امواج الکترومغناطیسی ۱۸
۲-۸- قطبیت موجک بازتاب یافته ۲۰

۲-۹- عمق نفوذ امواج GPR ۲۱
۲-۱۰- تفکیک پذیری ۲۲
۲-۱۱- شیوه‌های برداشت GPR ۲۳
۲-۱۱-۱- انتخاب فرکانس دستگاه برداشت ۲۵
۲-۱۱-۲- فاصله بین آنتن‌ها ۲۶
۲-۱۲- پردازش داده‌های GPR ۲۶
۲-۱۲-۱- ویرایش داده‌ها ۲۷
۲-۱۲-۲- تصحیح اشباع سیگنال ۲۸
۲-۱۲-۳- تصحیح صفر زمانی ۲۸
۲-۱۲-۴- فیلتر حذف زمینه ۲۹
۲-۱۲-۵- مهاجرت ۲۹
۲-۱۲-۶- بهره‌ها ۳۰
۳- فصل سوم ۳۳
۳-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ۳۴
۳-۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه ۳۵
۳-۳- چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه ۳۶
۳-۳-۱- سازند شمشک ۳۷

۳-۳-۲- سازند دلیچای ۳۸
۳-۳-۳- سازند لار ۳۸
۳-۳-۴- آهک‌های کرتاسه.. ۳۹
۳-۳-۵- سازند فجن... ۳۹
۳-۳-۶- سازند کرج ۳۹
۳-۳-۷- نهشته‌های کواترنری ۴۰
۳-۴- تکتونیک منطقه مورد مطالعه ۴۰
۳-۵- گسل دامغان ۴۱
۳-۶- گسل عطاری... ۴۱
۳-۷- گسل آستانه ۴۱
۳-۸- هیدرولوژی منطقه مورد مطالعه ۴۲
۴- فصل چهارم ۴۳
۴-۱- مقدمه.. ۴۴
۴-۲- پردازش داده‌های GPR ۴۵
۴-۳- تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌ها.. ۴۷
۴-۴- پردازش و تفسیر پروفیل ۳ .... ۴۸
۴-۵- پردازش و تفسیر پروفیل ۴ .... ۵۲

۴-۶- پردازش و تفسیر پروفیل ۵ .... ۵۵

۴-۷- پردازش و تفسیر پروفیل ۱ .... ۵۹

۴-۸- پردازش و تفسیر پروفیل ۲ .... ۶۳

۵- فصل پنجم ۶۷

۵-۱- نتیجه‌گیری ۶۸

۵-۲- پیشنهادات ۶۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: اثر ردپای رادار روی یک بازتابنده افقی ۱۲

شکل ۲-۲: شکل موجک قبل از و بعد از بازتاب عمودی متر ۱۹

شکل ۲-۳: نحوه‌ی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط ۲۰

شکل ۲-۴: مقایسه عمق نفوذ موج GPR در دو محیط متفاوت.. ۲۱

شکل ۲-۵: حداکثر عمق نفوذ قابل دسترسی در مواد زمین‌شناسی مختلف.. ۲۲

شکل ۲-۶: روش اجرای پروفیلزنی بازتابی.. ۲۴

شکل ۲-۷: روش اجرای نقطه میانی مشترک ۲۵

شکل ۲-۸: روش اجرای توموگرافی رادار ۲۵

شکل ۲-۹: روند پردازش کلی داده‌های GPR ۲۷

شکل۲-۱۰: یک رویدادثبت شده بر روی رده‌های بازتابی.. ۳۰

شکل ۲-۱۱: نمایش نحوهی عملکرد بهرهی AGC ۳۲

شکل ۳-۱: موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه.. ۳۴

شکل ۳-۲: ارتفاعات مشرف به چشمه علی دامغان و محدوده مورد مطالعه ۳۵

شکل ۳-۳: پهنه‌های رسوبی ساختاری ایران. ۳۶

شکل ۳-۴: نقشه زمین‌شناسی و واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه.. ۳۷

شکل ۴-۱: موقعیت پروفیل‌های برداشت شده ۴۴

شکل ۴-۲: نمایش طیف فرکانسی پروفیل ۱ (الف) و پروفیل ۲ (ب).. ۴۸

شکل ۴-۳: مقطع خام GPR پروفیل ۳ .... ۴۹

شکل ۴-۴: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۳ .... ۴۹
شکل ۴-۵: مقطع نهایی GPR پروفیل ۳ پس از اعمال تمامی پردازش‌های بالا ۵۱
شکل ۴-۶: شکستگی‌های موجود در پروفیل سوم. ۵۲
شکل ۴-۷: مقطع خام GPR پروفیل چهارم ۵۳
شکل ۴-۸: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۴ .... ۵۳
شکل ۴-۹: مقطع نهایی GPR پروفیل ۴ پس از اعمال تمامی پردازش‌ها ۵۴
شکل ۴-۱۰: مقطع خام پروفیل ۵ .... ۵۵
شکل ۴-۱۱: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۵ .... ۵۶
شکل ۴-۱۲: مقطع نهایی GPR پروفیل ۵ پس از اعمال تمامی پردازش‌ها ۵۷
شکل ۴-۱۳: عکس مربوط به قسمتی از سینه کار پروفیل ۵ .... ۵۷
شکل ۴-۱۴: مقطع خام GPR پروفیل ۱ .... ۵۹
شکل ۴-۱۵: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۱ .... ۶۰
شکل ۴-۱۶: مقطع نهایی GPR پروفیل ۱ پس از اعمال تمامی پردازش‌ها ۶۱
شکل ۴-۱۷: راستای برداشت پروفیل اول ۶۱
شکل ۴-۱۸: مقطع GPR خام پروفیل ۲ .... ۶۳
شکل ۴-۱۹: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۲ .... ۶۴
شکل ۴-۲۰: مقطع نهایی GPR پروفیل ۲ پس از اعمال تمام پردازش ۶۵

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مشخصات الکترومغناطیسی مواد ۱۷

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

ژئوفیزیک اکتشافی با هدف جستجوی ذخایر پنهان سودمند به کمک اندازه‌گیری‌های یک پارامتر فیزیکی در سطح زمین عمل می‌کند. موفقیت‌های روش‌های ژئوفیزیکی، به دلیل وجود تباین در ویژگی‌های فیزیکی ساختارهای زیرسطحی می‌باشد. روش رادار نفوذی به زمین[۱] یا مخفف آن "GPR" یک روش الکترومغناطیسی باقدرت تفکیک بالاست؛ که از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی کم‌عمق از جمله گسلش، رسوبات، آشکارسازی حفرات، بررسی شکستگی‌ها در سنگ‌های تزیینی، آشکارسازی اجسام مدفون در باستان‌شناسی و ... به کار برده می‌شود [Reynolds, 1999]. در این روش تباین در میزان ثابت دی‌الکتریک توده و محیط دربرگیرنده آن باعث آشکارسازی بی‌هنجاری می‌شود. این روش از نظر انتشار امواج الکترومغناطیسی در زمین و نحوه پردازش و تفسیر داده‌ها به لرزه‌نگاری بازتابی شباهت دارد. از مزیت‌های اساسی روش GPR می‌توان به ساده، غیر مخرب، سریع و با قدرت تفکیک زیاد بودن آن اشاره کرد [Shafri and et al , 2008]. بررسی سنگ با استفاده از GPR قطعاً یک روش جدید نیست، زیرا اولین مطالعات تاریخی به دهه هفتاد برمی‌گردد. با این‌حال، تنها در دهه گذشته فعالیت‌های تحقیقاتی آغاز شده است. روش GPR یک روش تحقیق سریع و مناسب برای ارزیابی شکستگی در سنگ طبیعی است، اما ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی سنگ باید از قبل برای کمک به تفسیر نتایج مشخص شده باشد.

۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده

اویسی مؤخر (۱۳۸۶) در مقاله ای که به بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر با روش GPR پرداخته به این نتیجه رسید که روش GPR برای تشخیص گسل‌ها و شکستگی‌های کم‌عمق می‌تواند مورد استفاده

---

[۱] Groud Penetrating Radar

قرار بگیرد. گرندجین[۱] و همکاران (۱۹۹۶) در پردازش داده‌های GPR برای نقشه‌برداری سه‌بعدی شکستگی در یک معدن سنگ مرمر در یونان به این نتیجه رسیدند که روش GPR نسبت به عمق نفوذ یک ابزار سریع جهت تعیین شکستگی در سنگ مرمر یا گرانیت با وضوح تصویر خوب در عمق کم می‌باشد. پارسم[۲] و همکاران (۲۰۰۶) از روش GPR برای نقشه‌برداری شکستگی‌ها و به‌عنوان یک راهنما برای استخراج گرانیت زینتی در معدنی در جنوب برزیل استفاده کردند که درنتیجه در توصیف ناپیوستگی ساختاری مسطح و همچنین در بلوک‌های هوازده عمیق زیرسطحی جداشده مفید واقع شد و برای نشان دادن شکستگی‌های عمودی زیرسطحی مناسب نبود. کادیوگلو[۳] (۲۰۰۸) برای تصویرسازی زیر سطحی و تعیین ضخامت لایه و ناپیوستگی‌ها در یک معدن سنگ مرمر از GPR سه‌بعدی استفاده کرد و به این نتیجه رسید تصویر سه‌بعدی GPR ابزار مناسبی برای تعیین تغییرات ضخامت لایه، مکان دقیق ناپیوستگی در دو محور x-y و مشخص کردن عمق دقیق ساختارهای زیر سطحی می‌باشد. لودس[۴] (۲۰۰۸) در مقاله ارزیابی سنگ طبیعی با GPR به این نتیجه رسید که GPR یک ابزار مناسب برای برآورد الگوی شکستگی‌های ناهموار است و تجسم سه‌بعدی و درک بهتری از سطح شکستگی و انتشار آن‌ها می‌دهد. آگریتمن[۵] و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی سیستم‌های شکستگی با استفاده از دو روش ژئوفیزیکی GPR و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)[۶] در معدن تراورتن بایبورت[۷] به نتایج موفقیت‌آمیزی رسیدند؛ که در رادارگرام بدست‌آمده از پروفیل‌های GPR سیستم شکستگی و ترک‌خورده سنگ تراورتن مشخص شد. ری[۸] و همکاران (۲۰۱۵) در ماکائل[۹] (آلمریا-

---

۱ Grandjean
۲ Porsam
۳ Kadioglu
۴ Luodes
۵ Ogretmen
۶ Electrical resistivity tomography
۷ Bayburt
۸ Rey
۹ Macael

اسپانیا) از روش GPR در تعیین رخساره‌های یک معدن سنگ مرمر استفاده کردند و نشان دادند که روش GPR اطلاعاتی با وضوح بالا برای تعیین بافت و ناهمسانگردی ساختاری در سنگ‌های تزیینی مانند سنگ مرمر و تراورتن فراهم می‌کند. آروسیو[1] و همکاران (۲۰۱۵) از روش GPR برای اندازه‌گیری ضخامت شکستگی‌های بلوک‌های سنگ مرمر زینتی استفاده کردند؛ که نتایج دلگرم‌کننده بود و نشان داد که در شرایط مطلوب GPR می‌تواند یک ابزار سریع و مؤثر برای تعیین پارامترهای شکستگی باشد.

۱-۳- ضرورت انجام و اهداف تحقیق حاضر

سنگ‌های تزیینی بسیار پرکاربرد و راهبردی در صنعت دکوراسیون و بخش ساخت‌وساز می‌باشد. در معادن سنگ تزیینی، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی کمک به کاهش درزه و شکستگی در بلوک‌های برش خورده می‌شود. هدف اصلی در معادن سنگ تزیینی، استخراج بلوک‌های بزرگ در اندازه‌های خاص است. بلوک‌های استخراجی در حالت ایده‌آل باید به شکل مکعب یا مکعب مستطیل می‌باشند. هرچه قدر ابعاد بلوک بزرگ‌تر و درزه و شکاف آن کم‌تر باشد، راندمان تولید بیشتر است و بلوک ارزش بالاتری دارد. یکی از عواملی که موجب محدودیت ابعاد بلوک استخراجی می‌شود، وجود صفحات ضعیف یعنی لایه‌بندی و درزه و شکاف‌های اصلی است. روش GPR به‌طور گسترده‌ای در بررسی خواص سنگ، به خصوص در درزه‌ها و شکستگی استفاده می‌شود. این روش اطلاعات با وضوح بالا برای تعیین بافت و ناهمسانگردی ساختاری در سنگ‌های تزیینی مانند مرمر و تراورتن را فراهم می‌کند. GPR یک ابزار ارزان، سریع، مؤثر و مفید برای ارزیابی کیفیت بلوک است و نیاز بلوک به تزریق رزین برای استحکام بلوک را معلوم می‌کند و همچنین برآوردهای لازم جهت فرآیند برش (جبهه کار) را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که در شرایط مطلوب یک ابزار سریع و مؤثر و غیر مخرب برای تعیین پارامترهای شکستگی است. از این رو بنا به دلایل ذکر شده،

[1] Arosio

هدف از انجام این تحقیق، مطالعه و بررسی درزه و شکستگی‌های معدن سنگ تزیینی تراورتن با استفاده از روش GPR در منطقه آستانه دامغان بوده است. تصویربرداری از زیر سطح با روش GPR و مسیریابی سنگ باعث جلوگیری از ضرر و زیان از نظر زمان و هزینه می‌شود. با چنین اطلاعات مفیدی، حفاری‌های زائد انجام نمی‌شود و اپراتورهای معدن دستاوردهای قابل‌ملاحظه‌ای در زمان و هزینه به دست می‌آورند.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش رو در پنج فصل تنظیم شده است. در فصل اول مقدمه‌ای در مورد موضوع تحقیق پایان‌نامه، ضرورت و همچنین هدف از انجام این تحقیق آورده شده است. در فصل دوم مبانی روش GPR و پردازش داده‌های آن توضیح داده شده است. در فصل سوم موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم برداشت داده‌های GPR و همچنین پردازش و تفسیر داده‌های GPR برداشت شده در منطقه مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفته است. و در آخر در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی روش GPR و پردازش داده‌ها

۲-۱- مقدمه

ژئوفیزیک را می‌توان جادوی فیزیک در زمین دانست. بدون این‌که از درون زمین پیچیده خبر دقیقی در دست باشد، با برداشت‌های نسبتاً ساده و به دنبال آن با تفسیرهای اصولی می‌توان اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی را با صرف هزینه و زمان اندک، از زمین به‌دست آورد. برای انتخاب روش‌های ژئوفیزیکی مناسب در منطقه، آگاهی از خواص فیزیکی ماده معدنی موردنظر و سنگ‌های درون‌گیر آن ضروری است. بدین ترتیب، در ضمن عملیات زمین‌شناسی ابتدایی باید اطلاعات در مورد وزن مخصوص، خواص مغناطیسی، الکتریکی، الاستیک و رادیواکتیویته سنگ‌ها نیز کسب کرد [مدنی، ۱۳۷۶].

GPR یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که در بررسی ساختارهای کم عمق زیر سطح و شناسایی تغییرات آنها از امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌کند.

GPR که معمولا آن را در حوزه روش‌های الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌کنند با ارسال امواج به زمین و دریافت بازتاب این امواج به بررسی ساختارهای نزدیک سطح می‌پردازد.

روش GPR یکی از روش‌های با قدرت تفکیک بالای ژئوفیزیکی است؛ که با استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز)، تغییرات خواص الکتریکی دراعماق کم را به منظور شناسایی و آشکارسازی ساختارهای زیر سطحی اندازه‌گیری می‌کند [Van Dam, 2000]. این ساختارها در صورتی توسط روش GPR قابل شناسایی هستند که دارای تباین مناسبی در مشخصه‌های الکترومغناطیسی با محیط اطراف خود باشند [Reynolds, 1999].

زمانی‌که پالس الکترومغناطیس ساطع شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می‌شود. این امر ناشی از تغییر امپدانس[۱]

[۱] Impedance

امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو محیط می‌باشد [Parasnis, 1997]. پالس الکترومغناطیسی بعد از بازتاب از اهداف زیرسطحی به آنتن گیرنده باز می‌گردد. در صورتی‌که زمان رفت این پالس‌الکترومغناطیسی از فرستنده تا بازتاب از یک هدف زیرسطحی و سپس زمان برگشت آن تا گیرنده اندازه‌گیری شود؛ می‌توان عمق هدف مورد نظر را تعیین کرد. عمق نفوذ این امواج کم و بستگی به هدایت الکتریکی وگذردهی الکتریکی محیط انتشار موج و مقدار فرکانس مورد استفاده دارد. در حالت کلی هرچه هدایت الکتریکی زمین بیشتر باشد (مانند محیط‌های شیلی و رسی)؛ عمق نفوذ کمتر و هرچه هدایت الکتریکی زمین کمتر باشد، (مانند محیط‌های آهکی و خشک) عمق نفوذ بیشتر می‌شود. همچنین هرچه فرکانس بالاتر باشد، عمق نفوذ کمتر و هرچه فرکانس پایین‌تر باشد، عمق نفوذ بیشتر است.در روش GPR، مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلافی بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو طرف فصل مشترک دارد. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترو مغناطیسی که از آنتن فرستنده ساطع شده و بعد از انعکاس یا (بازتاب) از توده بازتاب کننده به آنتن گیرنده باز می‌گردد اندازه گیری شود، می‌توان عمق توده مورد نظر را تعیین کرد.[Jol, 2009]

این امر در صورتی امکان‌پذیر است که سرعت پالس (موج الکترمغناطیس) در محیط مشخص باشد. بیشتر سیستم‌های GPR از دو آنتن برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کنند. طول آنتن به مشخصات پالس فرستنده و از همه مهم‌تر به پهنای پالس[۱] وابسته است. هرچه پالس دارای پهنای بیشتری باشد بایستی طول آنتن به کار رفته بزرگ‌تر باشد[Neal, 2004]

در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی، گیرنده، میدان الکتریکی پالس‌های ورودی را به صورت آنالوگ یا قیاسی[۲] (پیوسته) اندازه‌گیری می‌کند. این سیگنال در گیرنده تقویت شده و سپس به صورت رقومی در

---

[۱] Pulse width

[۲] Analog

حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شود؛ تا پردازش‌های بعدی روی آن‌ها صورت گیرد. برای این منظور سیگنال دریافتی در گیرنده نمونه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی که سیگنال در آن نمونه‌گیری می‌شود را فاصله نمونه-گیری[۱] و معکوس این فاصله زمانی را فرکانس نمونه‌گیری می نامند.[Jol, 2009]

مدت زمانی که رویدادها بین دو پالس متوالی ارسالی ثبت می‌شوند، پنجره زمانی[۲] نام دارد [Annan, 2001 ; Parasnis, 1997]. طول پنجره زمانی برابر زمان رفت و برگشت سیگنال تا عمق حداکثر بوده و در تمامی دستگاه‌های تجاری موجود، قابل تنظیم می‌باشد [Annan, 2001].

روش GPR دارای کاربردهای بسیاری است که از آن جمله می‌توان به تعیین ضخامت افق‌های خاک، عمق سطح ایستابی، آشکارسازی حفرات پرشده از هوا، کانال‌ها و تونل‌های مدفون، به نقشه در آوردن مناطق آلوده، آشکارسازی اشیای مدفون در بررسی‌های باستان شناسی، بررسی وضعیت آسفالت و ... اشاره کرد.

۲-۲- اصول انتشار امواج الکترومغناطیسی

امواج ژئورادار جزء امواج الکترومغناطیسی هستند. اساس امواج الکترومغناطیس، معادلات ماکسول است. معادلات ماکسول به طور ریاضی، فیزیک میدان‌های الکترومغناطیسی را تشریح می‌کنند و روابط ساختاری مشخصات مواد را بطور کمی تعیین می‌کنند.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (۲-۱)$$

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

---

۱ Sampling interval

۲ Time window

$$\vec{\nabla}.\vec{D} = \rho \qquad (۳-۲)$$

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \qquad (۴-۲)$$

در این معادلات $\vec{E}$ بردار شدت میدان الکتریکی[۱] (ولت بر متر)، ρ چگالی بار حجمی الکتریکی[۲] (کولن بر متر مکعب)، $\vec{B}$ بردار چگالی شار مغناطیسی[۳] (تسلا)، $\vec{J}$ بردار چگالی جریان الکتریکی[۴] (آمپر بر متر مربع)، $\vec{D}$ بردار جابجایی الکتریکی[۵] (کولن بر متر مربع)، t زمان (ثانیه) و $\vec{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر) است. که $\vec{J}$ و $\vec{B}$ و $\vec{D}$ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \qquad (۵-۲)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \qquad (۶-۲)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \qquad (۷-۲)$$

پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را تعیین می‌کنند؛ عبارتند از [Neal, 2004]: گذردهی دی‌الکتریک[۶] (ε)، رسانندگی الکتریکی[۷] (σ) و تراوایی مغناطیس[۸] (μ) که چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی را در زمین مشخص می‌کنند.

خواص الکترومغناطیسی بیشتر مواد و پاسخ مواد به میدان‌های الکترومغناطیسی با روابط آورده شده در بالا

---

[۱] Electric field strength

[۲] Electric chargedensity

[۳]-Magnetic flux density vector

[۴]Electric current density vector

[۵]Electric displacement vector

[۶] Dielectric permittivity

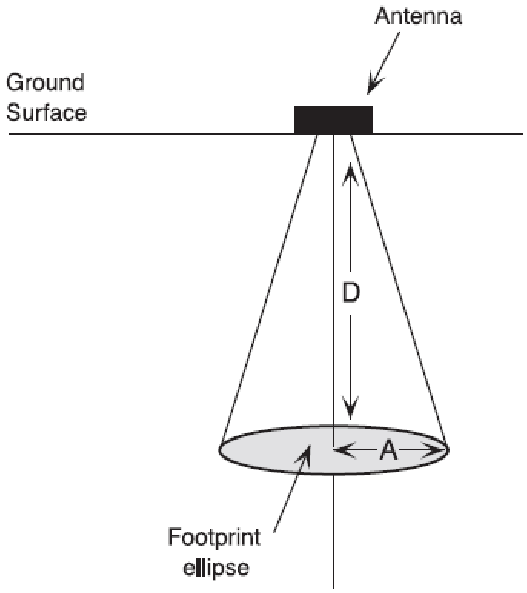
[۷]Electric conductivity

[۸] Magnetic permeability

شرح داده می‌شوند [Joll, 2009].

۲-۳- انتشار امواج GPR در درون زمین

اگر منبع مولد موج نقطه‌ای باشد؛ انتشار موج الکترومغناطیسی درون زمین به شکل مخروط بیضوی به سمت پایین حرکت می‌کند. به سطح مقطع مخروط حاصله ردپا گفته می‌شود[Neal, 2004] شکل(۲-۱) اثر ردپای رادار روی یک بازتابنده افقی را نشان می‌دهد. همچنین شعاع تقریبی سطح مسطح قاعده مخروط از رابطه‌ی (۲-۸) بدست می‌آید.



شکل ۲-۱: اثر ردپای رادار روی یک بازتابنده افقی[Annan, 2002]

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K-1}} \qquad (۲-۸)$$

که در آن، A شعاع تقریبی سطح قاعده مخروط، λ طول موج فرکانس مرکزی، D عمق تا سطح بازتاب و K ثابت دی الکتریک.

دو پارامتر رسانندگی الکتریکی و گذردهی نسبی از اهمیت بیشتری در بررسی‌های GPR دارند[Neal,

2004]. به موادی دی الکتریک گفته می‌شود که رابطه (۲-۹) در آنها صدق کند.

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} < 0.01 \qquad (۲-۹)$$

که در آن ε گذردهی الکتریکی، ω فرکانس زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه و σ رسانندگی الکتریکی بر حسب زیمنس بر متر می‌باشد.

۲-۴- گذردهی الکتریکی

گذردهی، قابلیت مواد قطبیده شونده، حفظ قطبیدگی و ذخیره انرژی در پاسخ به میدان الکتریکی خارجی است. هنگامی که ماده‌ای در یک میدان الکترومغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، اتم‌های آن تحت تاثیر جهت‌گیری مولکولی، یا قطبش داخلی قرار می‌گیرند که در این حالت بارهای الکتریکی از یکدیگر جدا می‌شوند، به طوری که یک میدان الکترومغناطیسی داخلی شکل می‌گیرد و میدان خارجی را متعادل می‌کند که نتیجه‌ی آن دخیره انرژی در شبکه‌ی مولکولی ماده است. لازم به ذکر است که بخشی از انرژی در اثر حرکت بارها به صورت گرما و پخش شدگی تلف می‌شود.

گذردهی دی‌الکتریک مهم‌ترین عامل کنترل کننده‌ی انتشار امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای مورد بررسی هستند[Annan, 2001]. گذردهی با یک تابع مختلط که دارای دو بخش مؤلفه ذخیره انرژی (حقیقی) و مؤلفه اتلاف انرژی (موهومی) است تعریف می‌شود.

$$\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_r' \qquad (۲-۱۰)$$

این دو مؤلفه نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. در این رابطه ε گذردهی دی‌الکتریک مختلط، ε_r قسمت حقیقی گذردهی مختلط، ε_r' قسمت موهومی گذردهی مختلط و $i = \sqrt{-1}$ می‌باشند. بخش موهومی (ε_r') با میزان افت انرژی الکتریکی که ناشی از رسانندگی الکتریکی و فرکانس است، مرتبط

می‌باشد[Daniels, 2004]. در این رابطه ε_r نسبت گذردهی یک ماده به گذردهی خلأ می‌باشد و توسط رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} \qquad (۲-۱۱)$$

که در این رابطه، ε_s گذردهی ماده‌ی تحت بررسی و ε_0 گذردهی خلأ می‌باشند.

موج الکترومغناطیس درون زمین به‌صورت یک مخروط سه‌بعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی توسط رابطه (۲-۱۲) محاسبه می‌شود [Neal, 2004]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \frac{1+\sqrt{1+(\sigma/\varepsilon\omega)}}{2}}} \qquad (۲-۱۲)$$

در رابطه بالا C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در هوا، σ رسانندگی الکتریکی محیط، μ_r نشان‌دهنده تراوایی مغناطیس نسبی و ε_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه‌ای موج GPR می‌باشند. عبارت $\sigma/\varepsilon\omega$ که به فاکتور اتلاف[۱] معروف است، در محیط‌های کم‌اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص نزدیک به صفر بوده و قابل صرف نظر می‌باشد. همچنین اثر μ_r در محیط‌های غیرمغناطیس و در محدوده فرکانس‌های GPR کوچک بوده و می‌توان آن را مطابق با محیط‌های غیر مغناطیس برابر ۱ در نظر گرفت.پس می‌توان رابطه (۲-۱۲) را به صورت زیر نوشت[Reynolds, 1997]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (۲-۱۳)$$

در استفاده از رابطه بالا باید این نکته را مد نظر قرار داد که در برخورد با مواد با رسانندگی بالا نظیر آب

۱ Loss factor

دریا و برخی از انواع رس‌ها و یا در برخورد با مواد مغناطیسی نظیر مگنتیت و هماتیت این رابطه صحیح نمی‌باشد[Annan, 2001]. ولی در اکثر کاربردهای GPR با تقریب خوبی می‌توان از این رابطه استفاده کرد.

۲-۵- رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی بیانگر سهولت حرکت الکترون‌ها در یک ماده، تحت تاثیر میدان اکتریکی خارجی است[Saaranketo, 1998]. این ویژگی پارامتر مهمی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی است و بخاطر همین در بررسی‌های GPR اهمیت دارد. زمانی که امواج الکترومغناطیسی در محیط انتشار می‌یابند، عوامل زیادی در کاهش قدرت سیگنال مؤثر هستند. این عوامل شامل پراکندگی امواج در اثر برخورد با اشیایی که ابعاد آنها در حدود طول موج رادار است، بازتاب و عبور از فصل مشترک، اتلاف انرژی به صورت گرما و پخش هندسی امواج هستند. البته مسبب اصلی کاهش انرژی سیگنال، میرایی یا تضعیف (اتلاف[۱]) است؛ که خود تابعی از مشخصات الکتریک و دی الکتریک محیط انتشار موج می باشد.

که α (ضریب میرایی یا تضعیف) عبارت است از:

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \tag{۲-۱۴}$$

که در رابطه‌ی بالا (δ) عمق پوست[۲] می‌باشد. اتلاف توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.:

$$\alpha = \omega\{(\mu\varepsilon / 2)[(1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2})^{1/2} -1]\}^{1/2} \tag{۲-۱۵}$$

که ω فرکانس زاویه‌ای موج، μ تراوایی مغناطیسی، ε گذردهی دی‌الکتریک و σ رسانندگی الکتریکی می‌باشند. این رابطه برای مواد غیر مغناطیسی معتبر است. مشاهده می شود که با افزایش فرکانس،

---

۱ Attenuatian

۲ Skin depth

میرایی بیشتر می شود .رسانندگی محیط و گذردهی نسبی هم بر روی میرایی تاثیر گذارند؛ اما بیشترین تاثیر بر میرایی را رسانندگی دارد.

۲-۶- تراوایی مغناطیسی

تراوایی مغناطیسی مقداری از انرژی الکتریکی یا الکترومغناطیسی ذخیره و پراکنده شده در ماده‌ای است؛ که در معرض میدان خارجی قرار دارد. تراوایی مغناطیسی هم به صورت مختلط است و شامل مؤلفه ذخیره انرژی الکتریکی (بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی) و مؤلفه اتلاف انرژی الکتریکی (بخش موهومی تراوایی مغناطیسی) می‌باشد[Powers, 1997].

$$\mu^* = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu' + i\mu'' \qquad (۲-۱۶)$$

در رابطه بالا μ، μ^*، μ' و μ'' به ترتیب تراوایی مغناطیسی ماده، تراوایی مغناطیسی نسبی، قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نسبی یا مولفه‌ی ذخیره انرژی و قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نسبی یا مولفه اتلاف انرژی می‌باشد. تراوایی مغناطیسی ($\mu = \mu^* \mu_0$) نسبت چگالی شار مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی می‌باشد که با رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad (۲-۱۷)$$

تراوایی مغناطیسی نسبی که به صورت نسبت تراوایی مغناطیسی ماده به تراوایی مغناطیسی خلأ تعریف می‌شود بر انتشار امواج رادار تأثیر گذار است[Pervin, 2015]. اما برای بیشتر موادی که در قلمرو کاربردهای GPR هستند، مقدار تراوایی مغناطیسی برای بیشتر خاک‌ها، سنگ‌ها و رسوبات غیرمغناطیسی، کوچک و تقریبا برابر با تراوایی مغناطیسی خلأ در نظر گر فته می‌شود. بنابراین تراوایی مغناطیسی نسبی برابر واحد بوده و در برداشت‌های GPR نقش چندانی ندارد[اولابی، ۲۰۰۱]. مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد

تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آنها بستگی دارد و هر کدام از این پارامترها دارای تأثیر به سزایی بر روی سرعت و اتلاف امواج GPR می‌باشند .برخی از مواد مانند یخ‌های قطبی، نسبت به امواج GPR شفاف بوده و این امواج بدون اتلاف زیاد می‌توانند از آن عبور کنند. لازم به توضیح است که فعالیت‌های اولیه در زمینه GPR در چنین محیط‌هایی صورت گرفته است[Anna, 2001]. مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آن‌ها بستگی دارد. در جدول ۲-۱ مشخصات برخی از مواد آورده شده است.

جدول ۲-۱: مشخصات الکترومغناطیسی مواد[Sensor and software, 1999]

مواد معمول	گذردهی نسبی (ε_r)	رسانندگی (mS/M)	سرعت (M/nS)	میرایی (dB/M)
هوا	۱	۰	۰/۳۰	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۱	۰/۰۳۳	۲×۱۰^{-۳}
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۱
آب دریا	۸۰	۳×۱۰^۳	۰/۰۱	۱۰^۳
ماسه‌خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱
ماسه‌اشباع	۲۰-۳۰	۰/۱-۱	۰/۰۶	۰/۰۳-۰/۳
سنگ آهک	۴-۸	۰/۵-۲	۰/۱۲	۰/۴-۱
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰
لای‌ها	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰
رس‌ها	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰
گرانیت	۴-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
نمک خشک	۵-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
یخ	۳-۴	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱

۲-۷- بازتاب و عبور امواج الکترومغناطیسی

موفقیت روش‌های ژئوفیزیک وابسته به وجود تباین در مشخصات فیزیکی توده‌های زیر سطحی است. روش GPR بر اساس تشخیص سیگنال بازتاب یا پراکنده شده استوار است. یکی از عوامل کاهش انرژی سیگنال ژئورادار ، بازتاب و عبور از هر فصل مشترک است. کمیتی که بازتاب امواج الکترومغناطیس را از توده‌های زیرسطحی سبب می‌شود ثابت دی‌الکتریک و یا گذردهی دی‌الکتریک می‌باشد. قسمتی از موج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترک دو محیط با امپدانس‌های الکترومغناطیس متفاوت، عبورکرده و قسمت دیگر آن بازتاب می‌شود .قسمتی از انرژی عبوری، ممکن است توسط فصل مشترک دیگری در زیر این لایه بازتاب شود و به همین ترتیب الی آخر[Parasnis, 1997]. ضریب بازتاب (R) و ضریب عبور (T) توسط روابط زیر بیان می‌شوند[Knödel and et al., 2007]:

$$R = \frac{Z_2 Cos\theta_1 - Z_1 Cos\theta_2}{Z_2 Cos\theta_1 + Z_1 Cos\theta_2} \qquad (۲-۱۸)$$

$$T = \frac{2Z_2 Cos\theta_1}{Z_2 Cos\theta_1 + Z_1 Cos\theta_2} \qquad (۲-۱۹)$$

در این رابطه θ_2،θ_1، به ترتیب زاویه تابش، زاویه شکست و Z_1 و Z_2 به ترتیب امپدانس الکترومغناطیسی محیط‌های اول و دوم می‌باشند. امپدانس الکترو مغناطیسی برای هر ماده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \qquad (۲-۲۰)$$

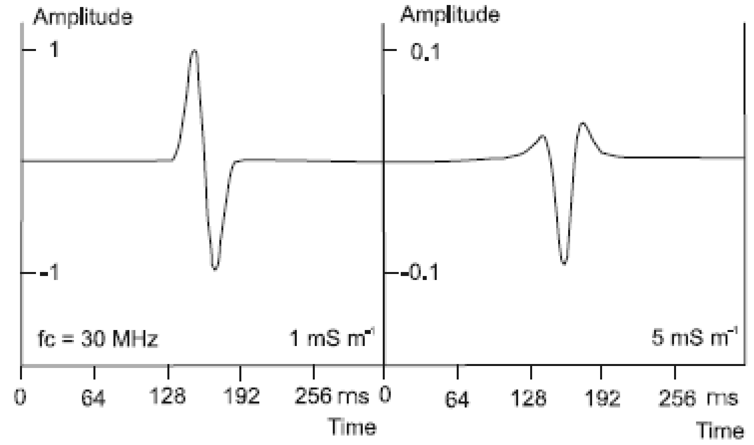
در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای، μ تراوایی مغناطیسی، σ رسانندگی، ε گذردهی الکتریکی و $j = \sqrt{-1}$ می‌باشند.

در بیشتر برداشت‌های GPR، امواج به صورت عمود ارسال و دریافت می‌شوند. هنگامی که موج به طور عمودی به مرز جداکننده دو محیط بتابد، ضریب بازتاب و ضریب عبور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{۲-۲۱}$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \tag{۲-۲۲}$$

بازتاب و عبور امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک بین دو محیط با مشخصات الکتریکی متفاوت، باعث تغییر شکل آنها می‌شود .این مسئله یکی از تفاوت‌های اساسی رفتار امواج صوتی و امواج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترک‌ها است[Knödel and et al, 2007].



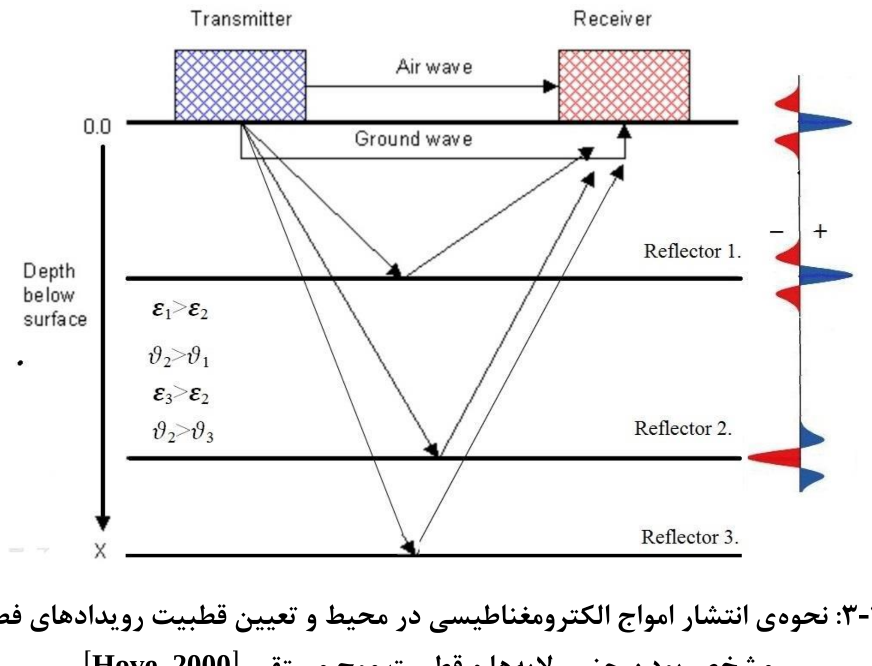
شکل ۲-۲: شکل موجک قبل از (سمت چپ) و بعد از (سمت راست) بازتاب عمودی از فصل مشترک بین دو محیط با تغییر رسانندگی از ۱ تا ۵ میلی زیمنس بر متر [Knödel and et al, 2007]

اگر امپدانس در فصل مشترک دو محیط افزایش پیدا کند فاز سیگنال بازتابیده شده مثبت و بر عکس اگر امپدانس در فصل مشترک دو محیط کاهش پیدا کند فاز موج بازگشتی منفی خواهد بود [رشمه کریم، ۱۳۹۰].

۲-۸- قطبیت موجک بازتاب یافته

اجسام و سطوحی که از لحاظ گذردهی دی الکتریکی با محیط اطراف خود تباین قابل توجهی دارند، امواج الکترومغناطیسی ارسالی از فرستنده دستگاه GPR را بازتاب و یک موجک با سه قسمت عمده در ردههای GPR ایجاد می‌کنند (شکل ۲-۳). قطبیت موجک بازتاب یافته به قطبیت آنتن‌های فرستنده و گیرنده بستگی دارد[Steven and et al., 1995]. با این وجود مشخص شدن قطبیت موجک بازتاب یافته از فصل

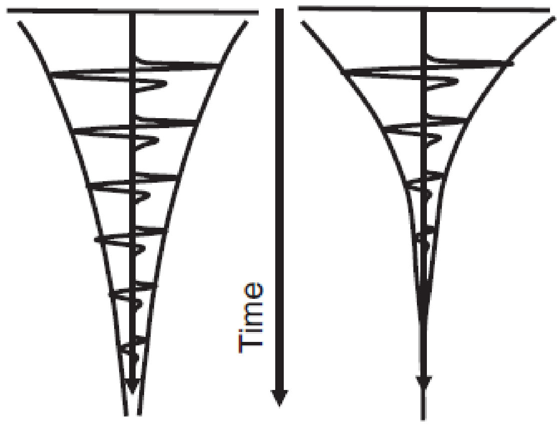
مشترک‌های معین زیر سطحی، می‌توان به مقایسه‌ی ماهیت لایه‌های ناشناخته زیر سطحی پی برد. با استفاده از جدول ۲-۱ و رابطه‌ی (۲-۲۱) می‌توان لایه‌های مختلف را با هم مقایسه و ضرایب بازتاب را در آنها به دست آورد.



شکل ۲-۳: نحوه‌ی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط و تعیین قطبیت رویدادهای فصل مشترک با مشخص بودن جنس لایه‌ها و قطبیت موج مستقیم[Hove, 2000]

۲-۹- عمق نفوذ امواج GPR

بیشترین عمقی که بتوان داده‌ها را به آن عمق نسبت داد، عمق نفوذ نامیده می‌شود. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس به مقاومت ویژه و گذردهی محیط انتشار و همچنین فرکانس موج مورد استفاده وابسته است. عمق نفوذ توسط فرکانس مرکزی GPR، ضریب اتلاف ساختارهای زیرسطحی که تابعی از رسانندگی الکتریکی این ساختارها است، کنترل می‌شود[Moller, 2006]. همان طور که در شکل ۲-۴ سمت چپ مشاهده می‌شود به دلیل رسانندگی محیط موج مستهلک شده و عمق نفوذ کاهش پیدا کرده و در سمت راست، موج عمق نفوذ بیشتری به علت رسانندگی کمتر محیط دارد. هر چه فرکانس و رسانندگی بیشتر باشد عمق نفوذ کمتر می شود[Reynolds, 1997]

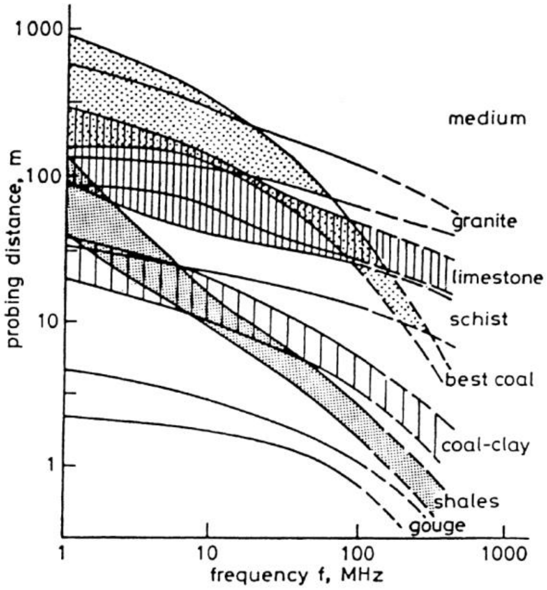


شکل ۲-۴: مقایسه عمق نفوذ موج GPR در دو محیط متفاوت[Jol, 2009]

کوک[1] در سال ۱۹۷۵ یک شکل شماتیک برای حداکثر عمق قابل دسترس برای سنگ‌ها و محیط‌های مختلف زمین شناسی ارائه کرده است [Reynolds, 1997]. همان‌طور که در شکل ۲-۵ می‌شود، موادی که دارای میزان رس بالایی هستند نسبت به سنگ‌های توده‌های دارای عمق نفوذ کمتری می‌باشند. این مسئله

[1] Cook

را می‌توان ناشی از رسانندگی بالاتر مواد حاوی رس نسبت به سنگ‌های توده‌ای دانست(جدول۲-۱).



شکل ۲-۵: حداکثر عمق نفوذ قابل دسترسی در مواد زمین‌شناسی مختلف به صورت تابعی از فرکانس [Reynolds, 1997]

بنابراین هرچه مقاومت ویژه الکتریکی محیط انتشار بیشتر باشد، عمق نفوذ GPR بیشتر است. از آنجا که آب ماده‌ای رساناست، هر چه رطوبت موجود در مواد زیرسطحی کمتر باشد مقاومت ویژه الکتریکی افزایش یافته و عمق نفوذ روش ژئورادار بالاتر می‌رود. درعمل استفاده از این روش در زمین‌های با مقاومت ویژه‌ی پایین(کمتر از ۱۰۰ اهم متر) نامناسب است. این شرایط در محیط‌های سیلتی، رسی و در حضور آب‌های زیرزمینی شور، معمول است[Van Overmeen, 1994].

۲-۱۰- تفکیک پذیری

به طور کل توانایی تفکیک سیگنال‌ها از اهداف نزدیک به هم را در ژئوفیزیک قدرت تفکیک گویند. در تفکیک پذیری به فرکانس مرکزی و پهنای باند و همچنین پارامترهای الکتریکی از قبیل رسانندگی و ضریب

دی‌الکتریک و نیز شکل هندسی هدف وابسته است[Knödel and et al, 2007]. بررسی تئوری تفکیک پذیری به منظور تخمین عملکرد GPR در تفکیک لایه‌ها و اهداف زیر سطحی بسیار مفید است. بهترین تفکیک‌پذیری عمودی در بررسی‌های GPR، ۱/۴ تا ۱/۲ طول موج غالب رادار است[Eder and et al, 2008]. فرکانس آنتن یک عامل مهم در طراحی برداشت، تعیین قدرت تفکیک و عمق نفوذ است. برای مثال، با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز طول موج برای یک محیط آهکی با سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه برابر با طول موج ۱/۲ متر است. از این رو تفکیک پذیری در این مورد ۰/۳ متر خواهد بود و با استفاده از این آنتن فصل مشترک‌های در فاصلهٔ ۳۰ سانتی‌متری را می‌توان تفکیک کرد. از آنجا که طول موج تابعی از سرعت امواج در محیط است، قدرت تفکیک GPR در سنگ‌های مرطوب بیشتر از سنگ خشک می‌باشد .این مطلب از سرعت فوق‌العاده پایین امواج در آب ناشی می‌شود[Kondel k and et al, 2007]. طول موج امواج رادار به سرعت و فرکانس موج الکترومغناطیسی بستگی دارد و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{V}{f} \qquad (۲-۲۳)$$

در این رابطه λ، V و f به ترتیب طول موج، سرعت و فرکانس امواج رادار می‌باشند.

۲-۱۱- شیوه‌های برداشت GPR

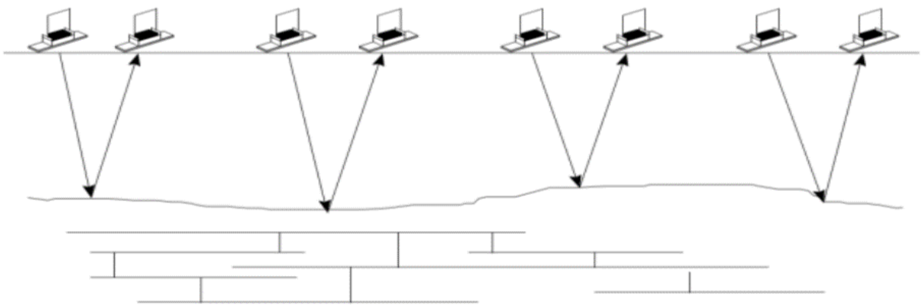
هدف در اندازه‌گیری های ژئورادار، به دست آوردن دامنه‌ی میدان انتشار یافته نسبت به زمان است. روش بازتابی[۱] و نقطه میانی[۲](*CMP*)، دو روش رایج برای تنظیم مکان قرار دادن آنتن‌های گیرنده و انتقالی با توجه به مشخصه هندسی، امکان محاسبه عمق بازتاب و زمان سیر[۳] سیگنال‌های GPR را فراهم می‌کند. در ادامه روش‌های اصلی برای انجام کاوش *GPR* بیان شده است.

---

۱ reflection method
۲ common midpoint (CMP)
۳ travel time

برداشت داده‌های GPR را می‌توان به ۳ شیوه عمده تقسیم‌بندی کرد: ۱-پروفیل‌زنی بازتابی[۱]، ۲-برداشت‌های CMP/WARR[۲]، ۳-توموگرافی GPR. از سه مورد اخیر، فقط مورد اول در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است.

۱- درروش پروفیل‌زنی بازتابی یا دورافت مشترک[۳]، آنتن‌های فرستنده و گیرنده با فواصل ثابت روی سطح زمین جابه‌جا می‌شوند. زمان انتشار امواج GPR تا بازتاب‌کننده و بازگشت تا گیرنده اندازه-گیری شده و درروی محور قائم و فواصل جابه‌جایی آنتن‌ها از مبدأ پروفیل روی محور افقی نشان داده می‌شوند [محمدی ویژه، ۱۳۸۷]. اگر سرعت امواج *GPR* مستقلاً اندازه‌گیری شود و یا این‌که از داده‌های چاه‌نگاری به‌دست آید، عمق بازتاب‌کننده‌ها (اهداف زیرسطحی) قابل‌محاسبه می‌باشد. مرسوم‌ترین آرایش آنتن‌ها، آرایش با آنتن‌های موازی و عمود بر خطوط برداشت داده‌ها است [*Annan, 2001*]. این روش پروفیل‌زنی که معمول‌ترین روش برداشت داده‌ها است، هم به‌صورت پروفیل‌زنی پیوسته و هم گسسته صورت می‌پذیرد. که در این پایان نامه فقط از روش پروفیل زنی پیوسته استفاده شده است.



شکل ۲-۶: روش اجرای پروفیل‌زنی بازتابی[Sensors and software, 1999]

۲- روش نقطه میانی مشترک (CMP) که درآن، فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده به طور متوالی

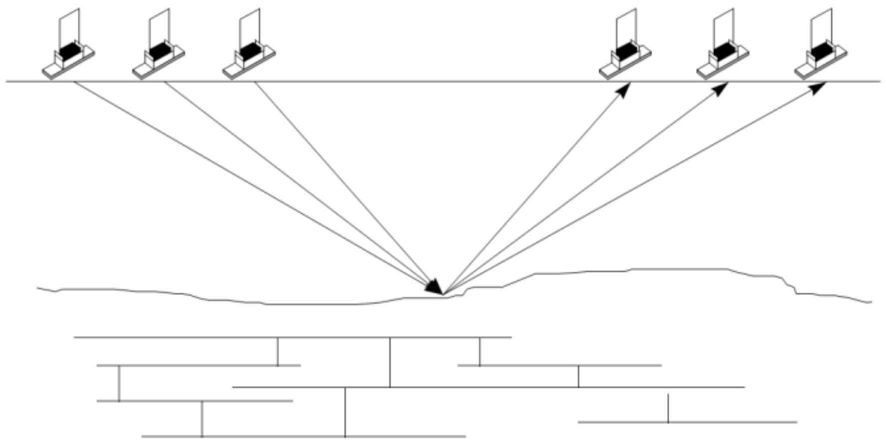
---

۱ Reflection profiling

۲ Wide angle reflection and refraction

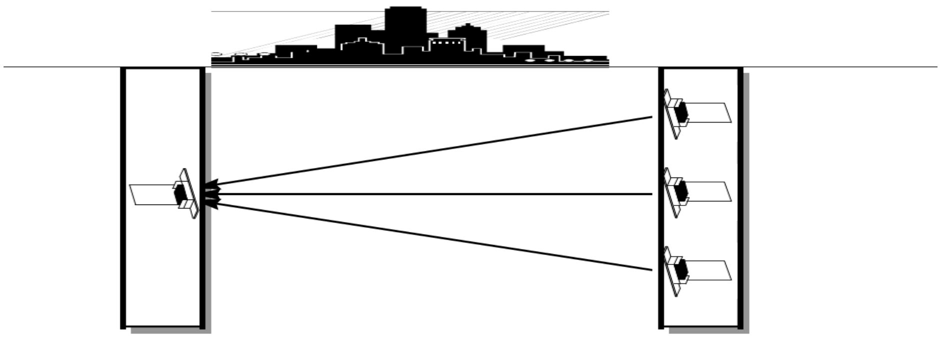
۳ Common offset

افزایش می‌یابد، درحالیکه نقطه میانی آن‌ها ثابت می‌ماند. برای به دست آوردن تخمینی از تغیرات سرعت امواج GPR نسبت به عمق، معمولاً از روش برداشت نقطه میانی مشترک استفاده می‌کنند.



شکل ۲-۷: روش اجرای نقطه میانی مشترک[Sensors and software, 1999]

۳- روش توموگرافی رادار که در آن، فرستنده و گیرنده در طرفین هدف مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۸: روش اجرای توموگرافی رادار[Sensors and software, 1999]

در روش پروفیل‌زنی بازتابی، برای اکتساب داده‌های مناسب باید دو پارامتر را مورد توجه قرار دهیم.

این پارامترها عبارتند از:

۲-۱۱-۱- انتخاب فرکانس دستگاه برداشت

برای انتخاب فرکانس پارامترهایی از قبیل قدرت تفکیک، عمق نفوذ و همچنین قابلیت حمل و نقل

تجهیزات مد نظر قرار می‌گیرد زیرا با تغییرات فرکانس این پارامترها نیز اهمیت می‌یابند.

$$f = \frac{150}{x\sqrt{k}} \quad (MHz) \tag{۲۴-۱}$$

که در آن x قدرت تفکیک مورد نظر است. برای عمق نفوذ بیشتر باید فرکانس را کم کرد. در انتخاب فرکانس عملیات، مواردی از قبیل تباین در مشخصات الکتریکی در برخورد با مرز تدریجی و خصوصاً نزدیک به هدف حائز اهمیت است [Jol, 2009].

۲-۱۱-۲- فاصله بین آنتن‌ها

بیشتر سیستم‌های GPR از آنتن‌های جداگانه برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کردند. توانایی تغییر فاصله‌ی آنتن‌ها می‌تواند کمک خوبی برای بهینه‌سازی سیستم به منظور آشکارسازی بهتر هدف‌های مختلف باشد. یک تخمین اولیه از فاصله‌ی بهینه بین آنتن‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

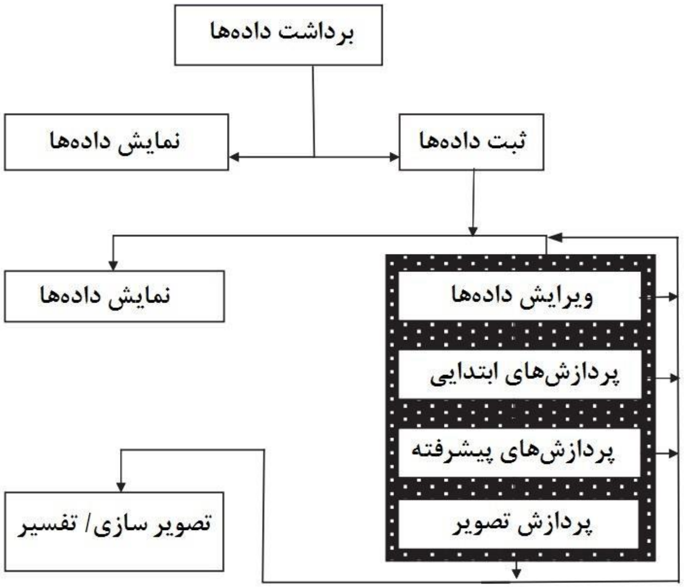
$$S = \frac{2 \times depth}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \tag{۲۵-۱}$$

که در آن ε_r گذردهی نسبی الکتریکی محیط برداشت است.

۲-۱۲- پردازش داده‌های GPR

داده‌های خام GPR حاوی تمام اطلاعات اولیه می‌باشند و هدف استخراج اطلاعات مطلوب نهفته در آنها است. برای بهبود کیفیت داده‌های خام و در نتیجه ساده‌تر کردن تفسیر باید گام‌های پردازشی مناسب برداشته شود. به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیک، غلبه بر محدودیت‌های ذاتی داده‌های برداشت شده، برای دست یابی به اطلاعات واقعی‌تر از توده‌های زیرسطحی می‌باشد. در صورتی که پردازش بر روی داده‌ها اطلاعات دقیق‌تری در اختیارمان قرار دهد، در نهایت منجر به تفسیر منطقی و مطمئن‌تری خواهد شد. در شکل ۲-۹ یک نمودار شماتیک از نحوه پردازش داده‌های GPR نشان داده شده است. گستره پردازش‌هایی

که بر روی داده‌های GPR بکار می‌روند توسط هدف مورد مطالعه تعیین می‌شود.



شکل ۲-۹: روند پردازش کلی داده‌های GPR [Joll, 2009]

دامنۀ پردازش‌های به کار رفته بر روی داده‌ها توسط پارامترهای مختلفی کنترل می‌شود .در برخی از مطالعات ممکن است حتی از اعمال پردازش‌های ابتدایی بر روی داده‌ها خودداری شود و در پاره‌ای از آن‌ها دامنۀ وسیعی از پردازش‌ها بر روی داده‌ها صورت پذیرد .همچنین استاندارد خاصی برای روال پردازش داده‌ای GPR موجود نیست، ولی می‌توان روال پردازش زیر را به عنوان یکی از معمول‌ترین آنها ذکر کرد .که به ترتیب عبارتند از:

۲-۱۲-۱- ویرایش داده‌ها

این مرحله برای تصحیح خطاهای ناشی از برداشت داده‌ها از قبیل معکوس کردن جهت پروفیل‌ها، پیوند فایل‌ها، حذف ردهای تکراری و اضافه کردن آن‌ها در ایستگاه‌هایی که برداشت صورت گرفته، ویرایش پارامترهای برداشت از قبیل فرکانس مرکزی، فاصلۀ آنتن‌ها و ... صورت می‌پذیرد.

۲-۱۲-۲- تصحیح اشباع سیگنال [1]

به علت فاصله زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که بصورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و بازتاب‌های نزدیک سطح، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود [Fisher and et al., 1996]. وقتی این اتفاق می‌افتد یک زوال آهسته فرکانس پایین[2] بر روی داده‌ها ایجاد می‌شود؛که بازتاب‌های فرکانس بالا را می‌پوشاند [Sensors and software, 1991]. برای حذف این مولفه‌های فرکانس پایین از روی داده‌ها از یک فیلتر بالاگذر استفاده می‌شود که Dewow نام دارد [Steven and et al, 1995].

۲-۱۲-۳- تصحیح صفر زمانی[3]

تصحیح صفر زمانی اولین مرحله‌ی پردازش داده‌های GPR است[Neal, 2004]. جابه‌جایی صفر زمانی می‌تواند به دلیل اختلاف دما بین وسائل الکتریکی و دمای هوا یا اتصالات کابل‌ها ایجاد شود .جابه‌جایی صفر زمانی بر روی تمام ردها در طول پروفیل صورت می‌پذیرد. نقطه صفر زمانی در واقع زمان رسیدن اولین رویداد است[Dojack, 2012]. دستگاه GPR به صورت خودکار زمان اولین موج ارسالی را در نمایش داده‌ها لحاظ می کند. اگر به دلایلی جابه‌جایی زمانی اولین رویداد در اختیار باشد؛ خطا در اندازه‌گیری به وجود می آید و پیوستگی بازتاب‌ها از بین رفته و تفسیر مشکل خواهد شد. این تصحیح باعث می‌شود تمامی بازتاب‌ها در مکان واقعی خود قرار گیرند. این تصحیح برای دست‌یابی به زمان سیر درست و عمق واقعی بازتاب کننده‌ها بر روی داده‌های GPR اعمال می‌شود[Dojack,2012].

---

[1] Signal Saturation Correction

[2] Wow

[3] Static corrction

۲-۱۲-۴- فیلتر حذف زمینه[1]

کاهش نوفه زمینه یکی از رایج‌ترین مراحل پردازش است که بر روی داده‌های GPR اعمال می‌شود.این فیلتر یک فیلتر فضایی است و به شکل یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند[Annan, 2005].این فیلتر، میانگین تمام تریس‌ها را در یک مقطع می‌گیرد و آن را از تمام تریس‌ها کم می‌کند. فیلتر حذف زمینه نوفه‌های زمینه را حذف کرده و بازتابنده‌های کم شیب را نیز حذف می‌کند. استفاده از این فیلتر در موارد پراتلاف (مانند خاکهای مرطوب) یک مرحله‌ی مهم و کلیدی در پردازش و تفسیر داده‌های GPR می‌باشد. در چنین محیط‌هایی، کوپلینگ[2] شدید آنتن- زمین و لایه‌های کم عمق نزدیک به سطح، ممکن است منجر به ارتعاش (برگشت امواج) قابل توجه‌ی در سیگنال‌های بعدی را پنهان کند[Jol, 2004]. این فیلتر در واقع اثرات نوفه‌های ناخواسته را تا حدودی کاهش می‌دهد و به عبارتی می‌توان گفت که باعث کاهش اثر زمینه می‌شود[بادپا، ۱۳۹۴].

۲-۱۲-۵- مهاجرت[3]

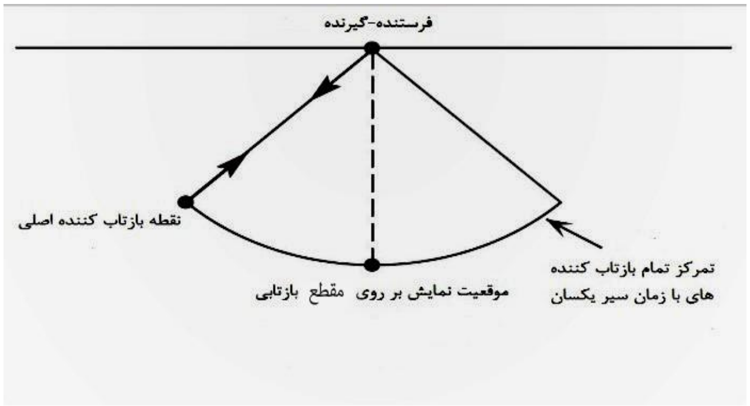
مهاجرت واپیچش فضایی است، که تأثیر جهت‌گیری منبع و گیرنده را برروی داده‌های بازتاب شده حذف میکند. هدف از به کارگیری مهاجرت بازسازی توزیع صحیح بازتاب کنندگی زیرسطح به صورت هندسی است[Jol, 2009]. در مقاطع GPR فرض این که رویدادهای ثبت شده بر روی ردهای بازگشتی، دقیقاً در زیر نقطه‌ی برداشت واقع شده‌اند؛ نادرست است، به این دلیل که آنتن‌های GPR امواج الکترومغناطیسی را به صورت یک مخروط سه‌بعدی پیچیده ارسال و دریافت می‌کنند. در نتیجه یک رویداد ثبت شده بر روی ردها می‌تواند از هر کجای مخروط باشد[Neal, 2004]. در اثر اعمال تصحیح مهاجرت

[1] Backgroundremoval

[2] Cpupling

[3] Migration

سیگنال‌های پخش شده متمرکز می‌شوند.مانند تبدیل یک هذلولی به یک هدف نقطه‌ای. در واقع هدف از اعمال این فیلتر، شبیه ساختن پروفیل‌های بازتابی به ساختارهای زمین‌شناسی است .این پردازش سعی در تعیین محل دقیق رویدادهای بازتابی زیرسطحی دارد. فیلتر مهاجرت تا حد امکان بازتاب دهنده‌های زیرسطحی را به مکان واقعی‌شان منتقل می‌کند، پراش‌ها را فرو می‌نشاند و از این طریق جزِئیات زیرسطحی از قبیل صفحه گسل‌ها را آشکار می‌سازد .از این رو می‌توان فیلتر مهاجرت را یک عملگر واپیچش دانست که قدرت تفکیک افقی را افزایش می‌دهد. مهاجرت بازتابنده‌های شیب‌دار را به موقعیت صحیح خود در زیر سطح انتقال می‌دهد[محمدی، ۱۳۹۳].در شکل ۲-۱۰ موقعیت فرستنده-گیرنده، نقطه بازتاب کننده‌ی اصلی و موقعیت نمایش آن بر روی پروفیل نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۰: یک رویداد ثبت شده بر روی ردهای بازتابی می‌تواند از هر کجای مخروط باشد. در یک مقطع مهاجرت نیافته رویدادهای ثبت شده مستقیماً به زیر فرستنده-گیرنده نسبت داده می‌شوند[Neal, 2004]

۲-۱۲-۶- بهره‌ها

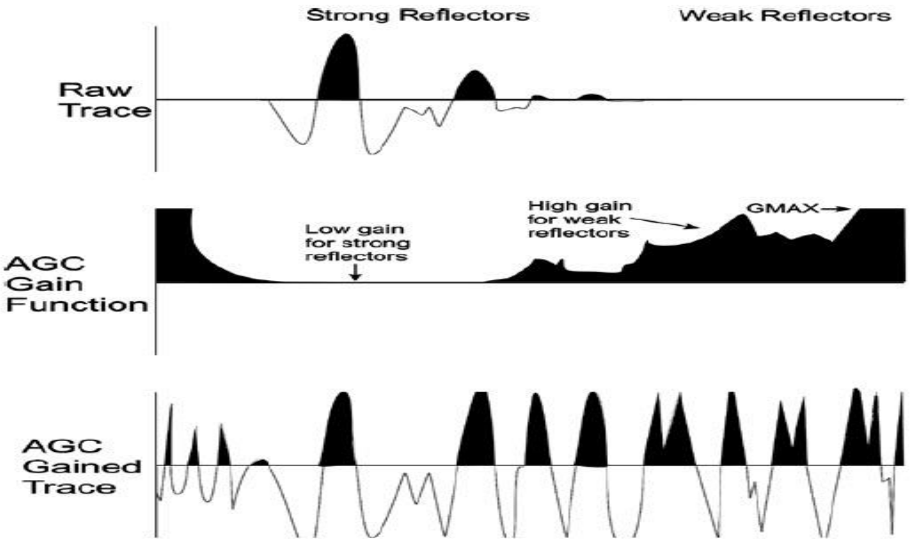
توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش سیگنال مربوطه به سرعت کاهش می‌یابد. ازاین‌رو پاسخ دریافتی از توده‌های عمیق، ضعیف‌تر می‌باشد. بنابراین تشخیص رویدادهایی که در اعماق زیاد قرار دارند، کار مشکلی خواهد بود [Annan, 2001]. بهره‌ها رویدادهای عمیق را که در اثر

تضعیف سیگنال و گسترش هندسی به درستی قابل تشخیص نیستند، را ترمیم می‌کنند [Cassidy, 2009]. با اعمال بهره‌ها بر روی داده‌ها توان سیگنال در اعماق بیشتر افزایش می‌یابد. استفاده از بهره‌ها راه مناسبی برای نمایش داده‌ها است؛ ولی نباید تاثیرات نامطلوب آن را در برجسته کردن نوفه‌های محیطی و سیستماتیک نادیده گرفت. استفاده از بهره‌ها باید با دقت انجام شود؛ تا اطلاعات مربوط به ساختارهای زیرسطحی بدون به وجود آمدن هر گونه مشکلی به دست آیند [Sato, 2009].

بهره‌ها انواع مختلفی دارند؛که شامل: بهره ثابت،بهره نمایی، بهره گسترش هندسی و نمایی[۱] (SEC) و کنترل بهره اتوماتیک[۲] (AGC) هستند؛ که هر بهره پارامترهای خاص خود را دارد [Cassidy, 2009]. بهره‌های AGC و SEC دو نمونه از محبوب ترین بهره‌ها هستند. بهره‌ی AGC دامنه‌های پایین هر رد را تقویت می‌کند و بیشتر در مشخص کردن پیوستگی بازتابنده‌ها کاربرد دارد. این بهره اطلاعات حاوی دامنه نسبی بازتاب کننده‌ها را حفظ نمی‌کند [Jol and Bristow, 2002]. به این ترتیب در صورت استفاده از این بهره اطلاعات به دست آمده از دامنه نسبی سیگنال‌ها از بین می‌روند. این اطلاعات در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند بوده و برای حفظ آن‌ها از انواع مختلف بهره‌ها نظیر بهره‌ی SEC استفاده می‌شود [Sato, 2009]. در بررسی‌های رسوب‌شناسی به نقشه در آوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است؛ از این رو در بیشتر مطالعات رسوب شناسی از بهره AGC استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه جهت تقویت سیگنال‌های عمیق از بهره‌ی AGC استفاده نمودیم. این بهره به طور معکوس با توان سیگنال متناسب است و بهره را تا حدودی که کاربر تعریف می‌کند بر روی داده‌ها اعمال می‌کند، از این رو سعی در یکسان سازی سیگنال‌ها دارد [Sensors and Software, 1999]. همانطور که در شکل ۲-۱۱ دیده می‌شود بهره‌ی AGC با اعمال یک تابع بهره که با عکس شدت سیگنال متناسب است تمام سیگنال‌ها را یکسان می‌کند.

[۱] Spreading and exponential compansation Gain

[۲] Automatic gain control



شکل ۲-۱۱: نمایش نحوه‌ی عملکرد بهره‌ی AGC [Sensors and Software]

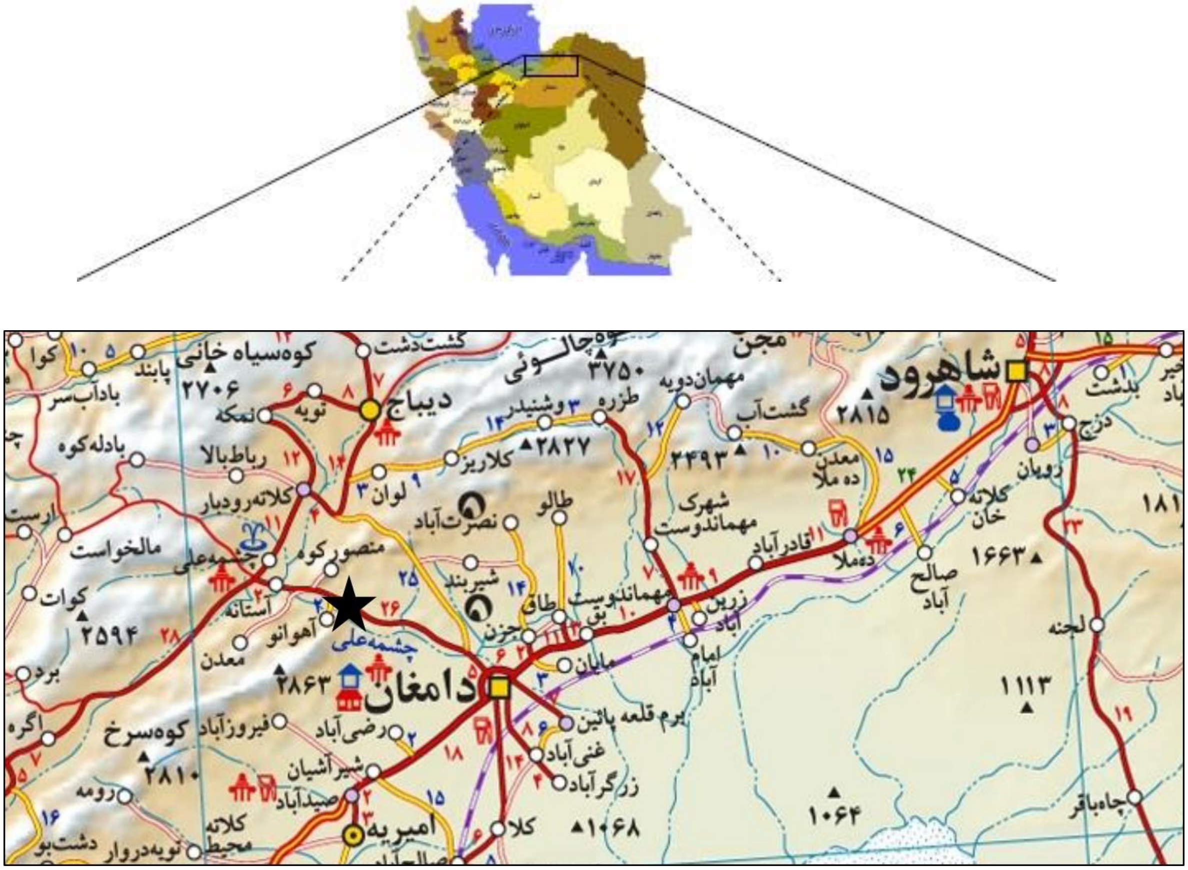
فصل سوم

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

۳-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

چشمه‌علی دامغان که نام اصلی آن بنا به نوشته مورخین علی بلاغ است در ۳۲ کیلومتری شمال غربی شهر دامغان قرار گرفته است که از طریق جاده آسفالته دامغان-کیاسر- ساری قابل دسترسی می‌باشد (شکل ۳-۱). این چشمه از نظر تقسیمات زمین شناسی در البرز شرقی و از لحاظ تقسیمات جغرافیایی در حوضه دهستان رودبار قرار دارد.



شکل ۳-۱: موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه و راههای دسترسی به آن(برگرفته از نقشه راه‌های کشور ۱۳۸۱)

به طور کلی محدوده مورد مطالعه، ارتفاعات جنوبی دامنه‌های البرز را شامل می‌شوند. از نظر ژئومورفولوژی ارتفاعات شمالی چشمه‌علی دارای دو تیپ کوهستانی همراه با دشت آبرفتی کوچکی در

حدواسط آن می‌باشد. ارتفاعات کوه‌های شمالی حدود ۱۲۰۰ متر بلندتر از کوه‌های جنوبی می‌باشد (شکل ۳-۲).

شکل ۳-۲: ارتفاعات مشرف به چشمه علی دامغان و محدوده مورد مطالعه

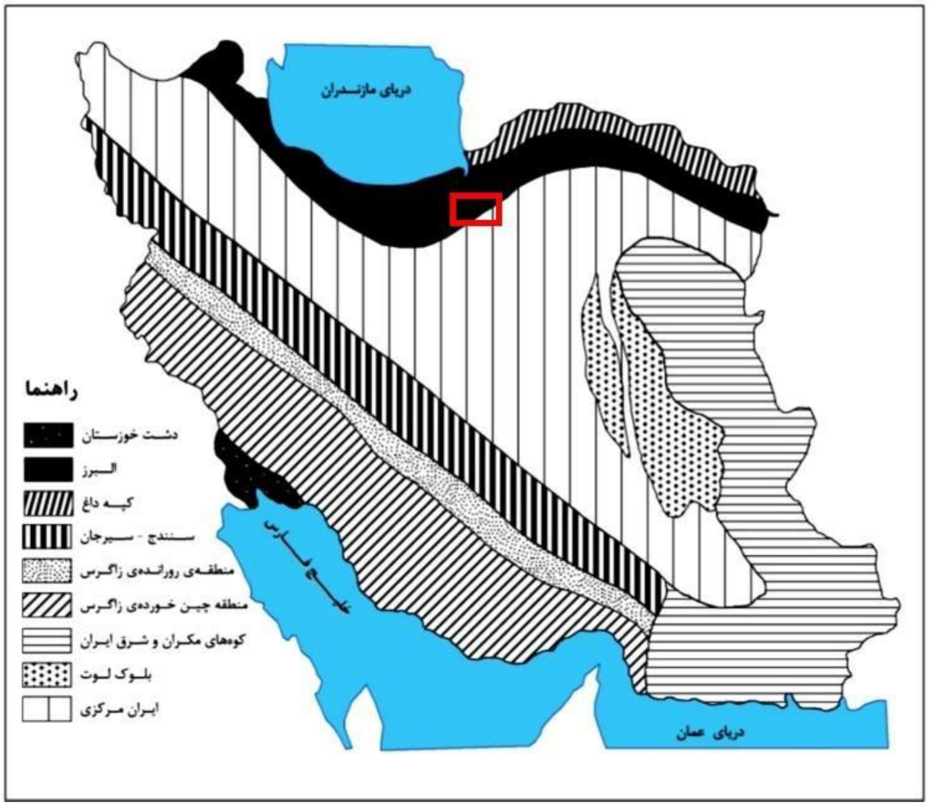
آب و هوا و اقلیم جنوب استان، خشک و کویری بوده و به سمت شمال استان بر مقدار بارندگی‌ها افزوده می‌شود. منطقه مورد مطالعه در شمال دامغان و دامنه‌های جنوبی البرز واقع شده و دارای زمستان‌های نسبتا سرد و تابستان‌های معتدل می‌باشد.

۳-۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

اشتوکلین[۱] (۱۹۶۸) ایران را به چند منطقه یا زون ساختمانی با وضعیت تکتونیکی و تاریخچه‌ی رسوبی متفاوت تقسیم کرده است (شکل ۳-۳).کوه‌های البرز در شمال ایران به شیوه خمیده‌ای با طولی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر از قفقاز در جمهوری ارمنستان و آذربایجان تا شمال افغانستان کشیده شده اند و ساختار آن بیشتر چین‌های ملایم و ناهمگنی با امتداد شرقی- غربی است. در بخش شرقی امتداد کلی، شمال شرقی-

[۱] Stoklin

جنوب غربی و در بخش غربی شمال غربی- جنوب شرقی و البرز مرکزی محل همگرایی این دو امتداد است. همچنین آتشفشان دماوند در محل این همگرایی یعنی البرز مرکزی واقع شده است. استان سمنان در دامنه‌های جنوبی ارتفاعات البرز (مرکزی- شرقی) و حاشیه شمالی کویر بزرگ قرار می‌گیرد و از نگاه زمین شناسی به دو پهنه ساختاری البرز و ایران مرکزی واقع دارد. حاشیه شمالی استان سمنان بخشی از دامنه جنوبی کوه‌های البرز (مرکزی- شرقی) ولی حاشیه جنوبی بخشی از ایران مرکزی است. با توجه به موقعیت زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه در شمال استان و زون البرز (مرکزی- شرقی) واقع شده است.

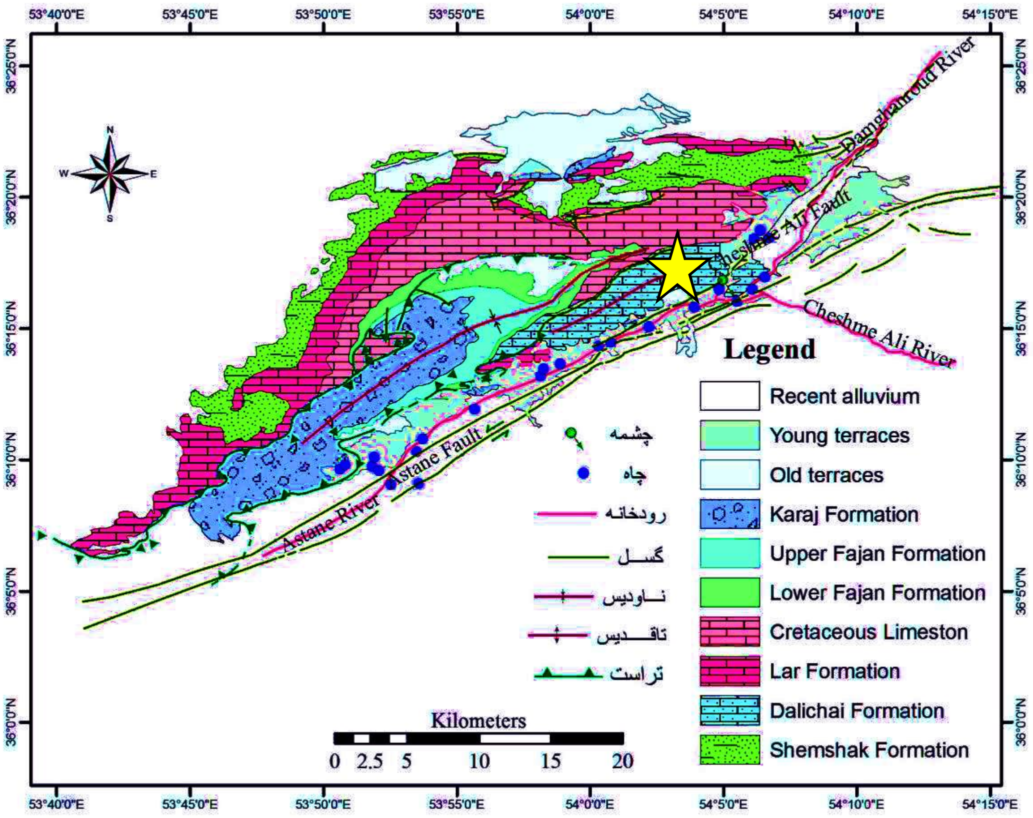


شکل ۳-۳: پهنه‌های رسوبی ساختاری ایران(Stoklin, 1968). موقعیت منطقه مورد مطالعه با علامت مستطیل قرمز رنگ مشخص شده است.

۳-۳- چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

واحدهای سنگ چینه‌ای موجود در منطقه مطالعاتی حوضه آبگیر چشمه‌علی سازندهای شمشک،

دلیچای، لار، آهک‌های کرتاسه، فجن، کرج و نهشته‌های کواترنری می‌باشند که به اختصار معرفی می‌شوند. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. علامت ستاره زرد رنگ منطقه برداشت می‌باشد.



شکل ۳-۴: نقشه زمین‌شناسی و واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه

۳-۳-۱- سازند شمشک

برش الگوی سازند شمشک در بالا دست دره روته در شمال گردنه لازیم واقع شده است. در محل برش الگو سازند شمشک به چهار زون سنگی تقسیم شده است که از پایین به بالا شامل ماسه سنگ پایینی، سری زغال‌دار پایینی، ماسه‌سنگ بالایی و سری زغال‌دار بالای می‌باشد. سن این سازند تریاس پسین تا ژوراسیک میانی(دوگر) است و ضخامت آن در برش الگو ۱۰۲۷ متر بوده ولی تغییرات جانبی ضخامت بسیار

زیاد است. لیتولوژی شمشک را ماسه سنگ، سیلتستون، شیل‌های زغال‌دار و عدسی‌های زغال‌سنگی و کنگلومرا تشکیل داده است.

در منطقه مورد مطالعه سازند شمشک بیشتر در یال شمالی ناودیس حوضه آبگیر رخنمون دارد. لیتولوژی این سازند از ماسه‌سنگ‌های دانه ریز، متراکم و سخت همراه با مارن و گاهی اوقات رخنمون‌های از کنگلومرا در بعضی نواحی مشاهده می‌شود. درزه و شکستگی‌های این سازند اندک بوده و از نظر هیدروژئولوژی می‌توان گفت این رسوبات ماسه‌سنگی، شیلی و سیلت سنگی شمشک می‌تواند نقش لایه نفوذ ناپذیر برای رسوبات قدیمی‌تر و جدیدتر از خود را داشته باشد [شکری، ۱۳۹۰].

۳-۳-۲- سازند دلیچای

نام این سازند از رودخانه دلیچای در نزدیکی جاده دماوند به فیروزکوه گرفته شده است.ضخامت برش الگو ۱۰۷ متر می‌باشد. سن این سازند ژوراسیک میانی(باژوسین- کالووین) و در برش الگو روی سازند شمشک و زیر سنگ آهک‌های لار قرار گرفته است. لیتولوژی این سازند شامل مارن و آهک‌های مارنی با لایه بندی منظم و میان لایه‌های از شیل مارنی می‌باشد.

سازند دلیچان در منطقه مورد مطالعه در یال جنوبی تاقدیس چشمه علی رخنمون دارد(شکل ۳-۳). لیتولوژی این سازند از آهک‌های تیره رنگ با میان لایه‌های مارنی تشخیص داده شد. سازند دلیچای در بعضی مناطق به صورت توده‌ای همراه با خوردشدگی و شکستگی‌های فراوان بوده است [شکری، ۱۳۹۰].

۳-۳-۳- سازند لار

نام این سازند از دره لار در شمال شرقی گرماب گرفته شده است. ضخامت آن ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر ولی گاه در البرز شرقی بعه ۱۰۰۰ متر نیز رسیده است.سن آهک‌های لار ژوراسیک بالایی(آکسفوردین- کیمرجین) که روی سازند دلیچای و زیر ژیپس و ملافیرها یا آهک های کرتاسه زیرین قرار می‌گیرد.این

سازند از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای حاوی چرت و نوارهای سیلیسی تشکیل شده است(آقانباتی، ۱۳۸۵). سازند لار در منطقه مورد مطالعه بیشتر در یال شمالی ناودیس چشمه علی برونزد دارد. سازند لار در حوضه آبگیر چشمه علی بر روی سازند شمشک و زیر سنگ آهک‌های کرتاسه قرار دارد. لیتولوژی این سازند آهک‌های با بافت ریز دانه به رنگ کرم تا روشن بوده، در نمونه دستی رگه‌های از کلسیت نیز مشاهده می‌شود[شکری، ۱۳۹۰].

۳-۳-۴- آهک‌های کرتاسه

بیشترین ارتفاعات موجود در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان را آهک‌های کرتاسه می‌سازند. این آهک‌ها بر روی سازند لار قرار گرفته و بیشتر در یال شمالی تاقدیس شمالی و نیز قسمت‌های از یال شمالی تاقدیس جنوبی رخنمون دارد. این آهک‌ها دارای لایه بندی منظم و ضخیم می‌باشد. ولی پوشش گیاهی آن خیلی کمتر از آهک‌های لار است[شکری، ۱۳۹۰].

۳-۳-۵- سازند فجن

برش الگوی سازند فجن در صد کیلومتری شرق تهران نزدیک روستای فاجان است. ضخامت این سازند متغیر است ولی در برش الگو حدود ۱۵۰ متر اندازه‌گیری شده است. لیتولوژی این سازند شامل کنگلومرا، ماسه سنگ‌های سرخ رنگ و مارن‌های ماسه‌ای است. سن این سازند بر اساس جایگاه چینه شناسی پالئوسن- ائوسن تشخیص داده شده است. در منطقه مورد مطالعه این سازند مابین محور تاقدیس و ناودیس قرار گرفته است[شکری، ۱۳۹۰].

۳-۳-۶- سازند کرج

برش الگوی سازند کرج در دره کرج واقع شده است. لیتولوژی این سازند توف‌های سبز رنگ است که ضخامت آن در برش الگو ۳۳۰۰ متر می‌باشد. سازند کرج به ۵ قسمت تقسیم می‌شود که از پایین به بالا

شامل شیل زیرین، بخش توف میانی، بخش آسارا، بخش توف بالایی و شیل کندوان است اما در سایر نقاط البرز به دلیل تغییر ضخامت عضو بندی نمی‌شود. این سازند در جنوب غربی حوضه رخنمون دارد(شکل ۳-۴).

۳-۳-۷- نهشته‌های کواترنری

نهشته‌های کواترنر منطقع مورد مطالعه حاصل پدیده هوازدگی و فرسایش رسوبات قدیمی‌تر بودهف این نهشته‌ها بیشتر در دامنه‌های ارتفاعات، مخروطه افکنه‌ها و دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها نهشته شده‌اند (Qt1، Qt2، Qa1 در شکل ۳-۴). بیشتر از جنس ماسه وسیلت با لایه‌بندی نازک می‌باشند. در نواحی بالا دست چشمه علی با شیبی حدود ۹ درجه به سمت جنوب شرقی نهشته شده‌اند.

۳-۴- تکتونیک منطقه مورد مطالعه

در بیشتر نواحی البرز، رسوبات پالئوزوییک- تریاس میانی، به رغم نبودهای چینه‌ای فراوان، هم شیب‌اند که مشانگر حرکت‌های زمین ساختی از نوع زمین‌زا است. در تریاس پسین همزمان با رویداد کوهزایی سیمیرین پیشین، اگرچه رویداد ناشی از برخورد حاشیه قاره‌ای فعال و پویای توران با حاشیه قاره‌ای نوپویای البرز موجب شکل‌گیری گسل‌های رانندگی و فرورانش مجموعه اقیانوسی تتیس کهن بر روز البرز شمالی شده ولی، نخستین کوهزایی آلپی واقعی در پالئوسن همزمان با رویداد لارامید، رخ داده که با گسلش راندگی، چین خوردگی و فراخاست، پیدایش حوضه‌های میان کوهی، انباشت آواری‌های همزمان با کوهزایی و مهاجرت پیش خشکی به سمت جنوب همراه بوده است. کوهزایی بعدی در آغاز الیگوسن بوده که ماگماتیسم درونی، از آب خارج شدن گسترده زمین و گسترش حوضه‌های میان کوهی از پیامدهای آن است. بازپسین فاز کوهزایی آلپی در اواخر پلیوسن یا اوایل پلیستوسن صورت گرفته که حاصل آن، گسلش، راندگی، مرتفع شدن و سیمای امروزی البرز است. سیستم اصلی گسل‌های منطقه مورد مطالعه شامل راندگی‌ها، گسل‌های

امتداد لغز و معکوس است.

۳-۵- گسل دامغان

گسل دامغان از ۱۰ کیلومتری شمال شهر دامغان می‌گذرد و با برش نهشته‌های کواترنری، معرف یک گسل کواترنری است. این گسل با روند غرب جنوب غربی- شرق شمال شرقی به عنوان یک گسل کوهپایه‌ای در طی تاریخ تکتونیکی در چندین تکه مستقل از هم، سازوکارهای متفاوت و گاه متضادی از خودش نشان داده است. به نحوه‌ی که در تکه‌ای راندگی، در تکه‌ای معکوس بزرگ زاویه و در تکه‌ای حتی عادی با مولفه امتدادی بوده است. ولی در تمام این حالات، با جنبش‌های خود موجب همبری واحدهای جوان‌تر سنوزوئیک با سنگ‌های قدیمی‌تر مزوزوئیک و پائوزوئیک شده است. این گسل از نوع گسل کششی(نرمال) با شیب به سوی جنوب همراه با فروافتادن بخش جنوبی دانست.

۳-۶- گسل عطاری

گسل عطاری در چند کیلومتری جنوب غرب گسل دامغان از حوالی روستای قوشه تا حدود ۲۵ کیلومتری خاور سمنان با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی امتداد دارد. نقش این گسل به گونه‌ای است که می‌توان آن را جداکننده دو پهنه‌ی ساختاری- رسوبی البرز و ایران مرکزی دانست.

۳-۷- گسل آستانه

در باختر روستای آستانه(واقع در شمال باختری شهر دامغان) و دره رودخانه آستانه، دو گسل موازی و کنار هم با راستای شمال خاوری- جنوب باختری دیده می‌شوند که در نزدیکی ۱۰ کیلومتری جنوب باختر آستانه، رسوبات آبرفتی کواترنر را به روشتی بریده و همراه با آبراهه‌های پهنه، به شکل چپ بر[1] جابه‌جا نموده است. گسل آستانه یکی از گسل‌های نادر البرز کوه است که به سبب نزدیکی با مرز جنوبی البرز و

وجود رسوبات آبرفتی کواترنر در کنار آن، به روشنی جنبش جوان کواترنر را نشان می‌دهد. گسل آستانه مرز بین البرز جنوبی و شمالی می‌باشد. درازای شناخته شده گسل آستانه بیش از ۷۵ کیلومتر بوده و ساز و کار آن راندگی با مولفه راست لغز چپ بر است.

با توجه به مطالب ذکر شده روند کلی ساختارهای اصلی البرز شرقی و منطقه مورد مطالعه شمال شرقی- جنوب غربی بوده که در نتیجه حرکات زمین ساختی و برخورد صفحه توران با عربستان می‌باشد.

۳-۸- هیدرولوژی منطقه مورد مطالعه

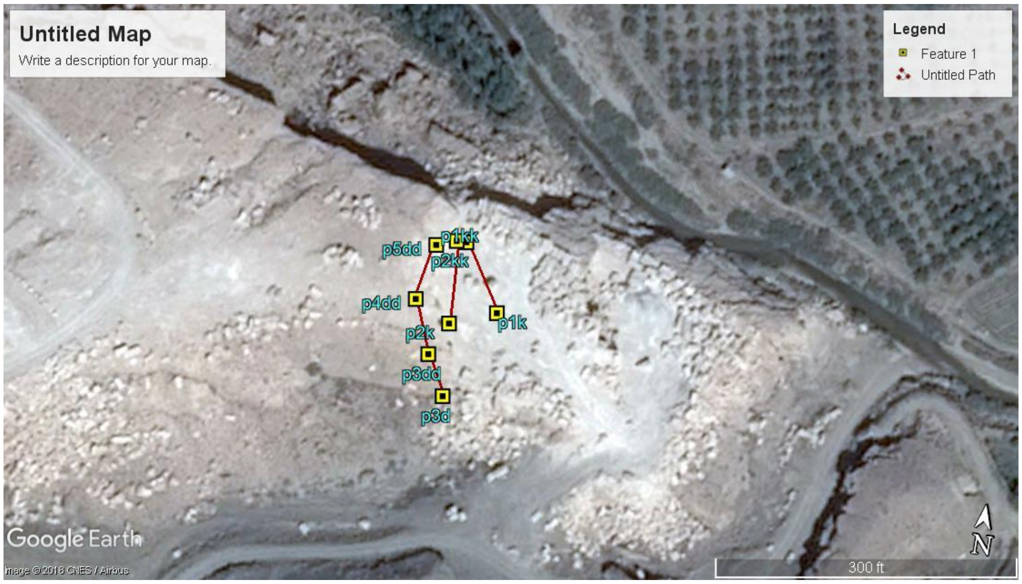
مهمترین رودخانه منطقه، رودخانه دائمی چشمه علی می‌باشد که از روستای آستانه شروع شده و با جهت جریان کلی شمال غرب- جنوب شرق، با طی مسیر ۳۰ کیلومتری در نهایت وارد دشت دامغان شده و اراضی شهر و روستاهای دشت دامغان را مشروب می‌کند.حوضه آبگیر رودخانه چشمه علی مشتمل بر دو حوضه آبگیر الف) دامغان رود ب) آستانه می‌باشد [شکری، ۱۳۹۰].

فصل چهارم

برداشت عملیات صحرایی، پردازش و تفسیر داده‌های GPR در منطقه مورد مطالعه

۴-۱- مقدمه

برداشت داده‌های GPR در منطقه آستانه چشمه علی دامغان، در معدن سنگ تزیینی تراورتن با هدف بررسی درزه و شکستگی‌ها انجام شد. در این برداشت از آنتن فرستنده پوششی[۱] با فرکانس مرکزی ۳۰۰ مگاهرتز که وضوح و قدرت تفکیک نسبتا بالایی نشان می‌دهد، استفاده شد. در این معدن ۵ پروفیل همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، برداشت شد که از این ۵ پروفیل، ۲ پروفیل بر روی زمین معدن و ۳ پروفیل بر روی بالای دیواره سینه کار استخراجی معدن طراحی شده است. دلیل برداشت این ۳ پروفیل آخر قابل رویت بودن درزه و شکستگی‌های موجود در سنگ معدن بود؛ تا با استفاده از آن بتوان نتایج حاصل از برداشت را با شواهد موجود در معدن ارزیابی نمود. در برداشت پروفیل‌ها دستگاه باید با سرعتی ثابت و آرام حرکت داده شود. همچنین برای افزایش دقت در برداشت‌ها نقطه شروع و انتهای پروفیل‌ها به کمک شاخص ثابتی مشخص شد. موقعیت این پروفیل‌های برداشت در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: موقعیت پروفیل‌های برداشت شده

---
[۱] Shielded

داده‌های GPR با استفاده از دستگاه GPR ساخت شرکت GSSI آمریکا برداشت شدند. دستگاه مذکور دارای دو آنتن فرستنده و گیرنده پوششی است. ویژگی دیگر این دستگاه فاصله کم آنتن از سطح زمین است؛ که باعث کاهش میزان نوفه دریافتی از محیط اطراف می‌شود. همچنین این فاصله کم، حرکت دستگاه را در سطح ناهموار مختل می‌کند. در نتیجه کاربرد دستگاه محدود به محیط‌های هموار و مسطح می‌شود.

دستگاه GPR در واقع زمان رسیدن امواج را اندازه‌گیری می‌کند. برای تعیین دقیق رویدادها باید مقاطع زمانی به عمقی تبدیل شوند که برای این کار باید اطلاعات دقیقی نسبت به سرعت امواج رادار در ساختارهای زیر سطحی در اختیار باشد. می‌توان سرعت را حین برداشت و در محل برداشت مشخص کرد.

سه روش برای تخمین سرعت وجود دارد که عبارتند از:

۱) روش استفاده از تحلیل سرعت موج رادار با تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده می‌باشد.

۲) سرعت موج را می‌توان با استفاده از شناسایی جنس لایه تخمین زد.

۳) در این روش، از روش برون راند نرمال[۱] (شکل هذلولی‌های پراش در مقاطع) استفاده می‌شود.

برای تخمین عمق در این پایان‌نامه از روش دوم استفاده شد. با توجه به جنس سنگ تراورتن و با استفاده از جدول ۲-۱ سرعت با تقریب خوبی ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه در نظر گرفته شد؛ که با استفاده از سرعت به دست آمده مقاطع زمانی به مقاطع عمقی تبدیل شد.

پردازش داده‌های برداشت شده توسط نرم‌افزار REFLEX-W صورت گرفته است.

۴-۲- پردازش داده‌های GPR

هدف از پردازش داده‌ها از بین بردن نوفه‌های موجود در داده‌ها برای به دست آوردن اطلاعات دقیق

[۱] Normal move out

اهداف زیر سطحی می‌باشد. در این پایان نامه، از یک روال پردازش برای تمامی پروفیل‌ها استفاده شده است. برای دست‌یابی به تصاویری واضح‌تر از ساختارهای زیر سطحی و بررسی شکستگی‌های موجود در بلوک‌های سنگ از مراحل ذکر شده در زیر؛ استفاده شده است.

الف) برای پردازش داده‌های حاصل از برداشت ابتدا از فیلتر Dewow استفاده شد. فیلتر Dewow یک فیلتر بالاگذر است که به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین، بر روی داده‌ها اعمال شد. مقدار پنجره زمانی ۱۰ نانوثانیه در پردازش‌ها در نظر گرفته شده است.

ب) در گام بعدی از تصحیح صفر زمانی برای قرارگیری رده‌ها در مکان واقعی خود و دست‌یابی به زمان سیر درست و عمق واقعی از این تصحیح استفاده شده است.

ج) بعد از تصحیح فیلتر صفر زمانی بر روی داده‌ها از کنترل بهره اتوماتیک (AGC) به منظور افزایش توان سیگنال در اعماق زیاد استفاده شده است.

د) در این مرحله، از فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها به منظور کاهش نوفه زمینه در مقاطع پردازش شده، استفاده شد.

ه) در این مرحله از پردازش از فیلتر میان گذر، که ترکیبی از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر می‌باشد، استفاده شده است. این فیلتر اجازه عبور محدوده معینی از فرکانس که به وسیله منطقه عبور[۱] تععین می‌شوند، را می‌دهد. این محدوده معین فرکانس به وسیله تعیین چهار فرکانس، مشخص می‌شود که به فرکانس اول فرکانس قطع پایین[۲]، فرکانس دوم فرکانس آستانه اول[۳]، فرکانس سوم فرکانس آستانه دوم[۴] و

---

۱ Transition zone

۲ Lower cutoff

۳ Lower plateau

۴ Upper plateau

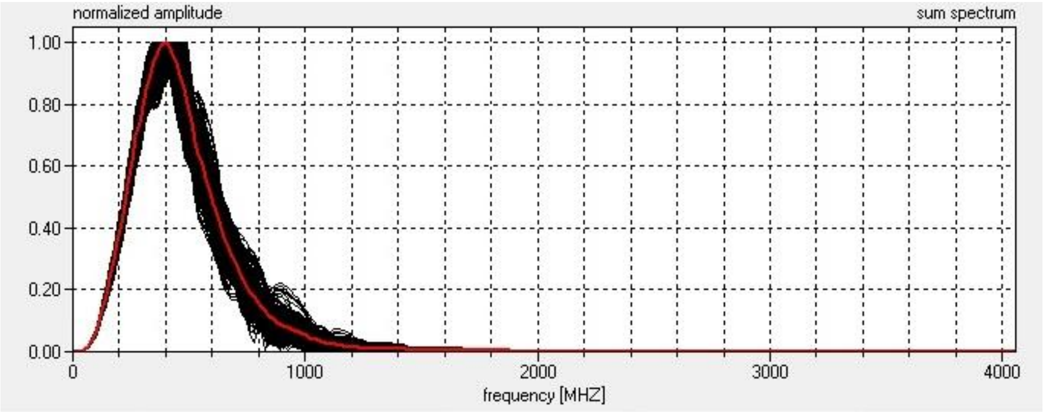
فرکانس چهارم فرکانس قطع بالا[۵] گفته می‌شود.[Jol, 2009]

و) در این مرحله که مرحله آخر پردازش می‌باشد از فیلتر مهاجرت استفاده شده است. با توجه به اینکه آنتن‌های فرستنده و گیرنده امواج الکترومغناطیسی را به صورت یک مخروط ارسال می‌کنند، یک رویداد ثبت شده بر روی ردها می‌تواند از هر کجای مخروط باشد. در نتیجه رویدادهای ثبت شده دقیقا زیر نقطه‌ی برداشت واقع نشده‌اند. با اعمال این پردازش، بازتاب‌ها به موقعیت صحیح‌شان برگردانده می‌شوند. قبل از به‌کارگیری روش مهاجرت، سرعت امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای زیر سطحی، بایستی تعیین شود. در اعمال پردازش مهاجرت، معمولا از روش مهاجرت با سرعت ثابت استفاده می‌شود.

۴-۳- تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌ها

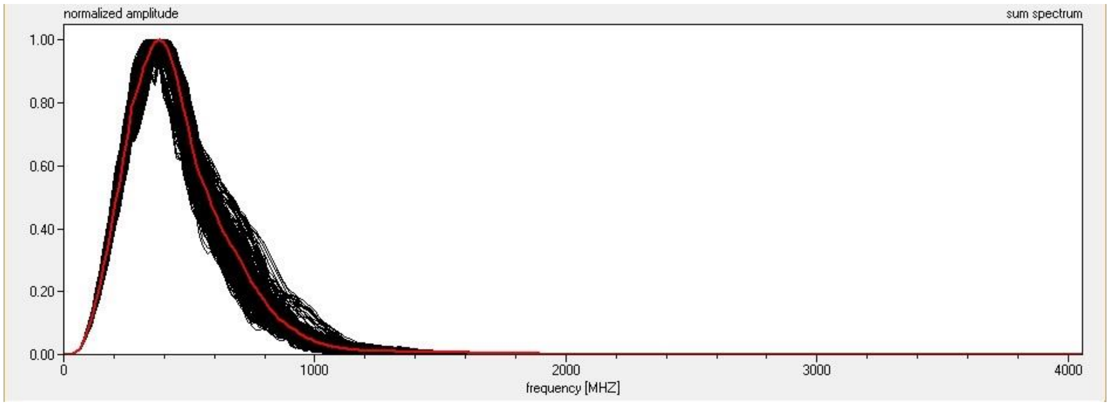
قبل از هرگونه پردازش باید دیدی صحیح از میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های مورد بررسی وجود داشته باشد. نمودار طیف دامنه به‌منظور تعیین فرکانس غالب و طراحی فیلترهای مناسب برای حذف نوفه‌های با فرکانس مشخص، مفید است. در شکل ۴-۲ فقط تغییرات میانگین طیف دامنه نسبت به فرکانس پروفیل ۱ و ۲ نمایش داده شده و از آوردن بقیه پروفیل‌ها صرف نظر شده است.

الف



[۵] Upper cutoff

ب



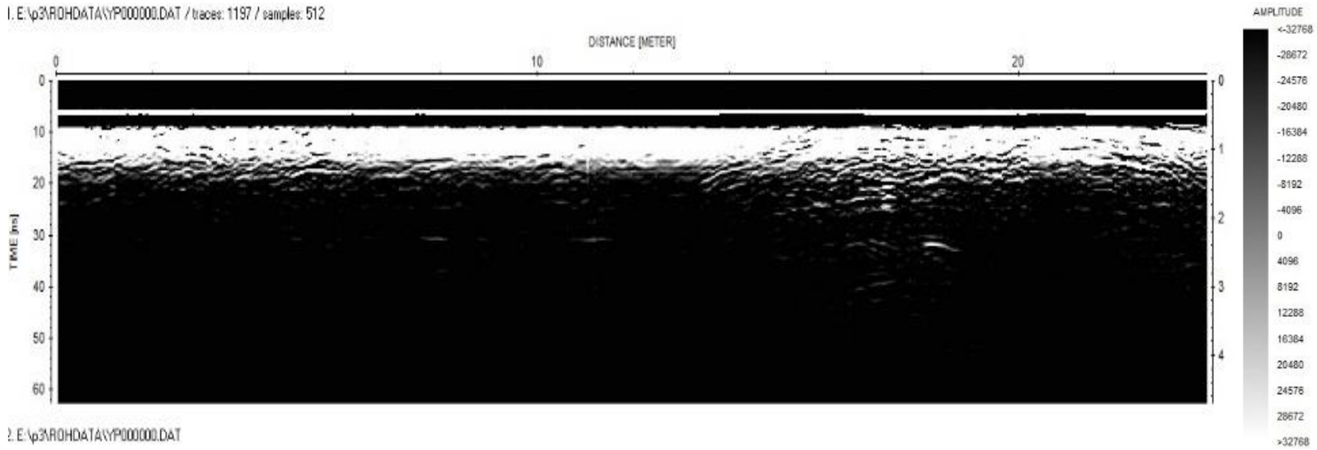
شکل ۴-۲: نمایش طیف فرکانسی پروفیل ۱ (الف) و پروفیل ۲ (ب)

در واقع همان‌طور که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است، طیف فرکانسی همه رده‌های یک پروفیل بر روی نمودار قابل مشاهده است. نمایش طیف فرکانسی رده‌های پروفیل با نمودار مشکی و میانگین طیف فرکانسی با نمودار قرمز قابل مشاهده می‌باشد.

در این پایان‌نامه پروفیل اول و دوم در انتها، برای تفسیر بهتر قرار گرفته است و از پروفیل سوم که بر روی جبهه‌کار برداشت شده شروع به پردازش کرده‌ایم.

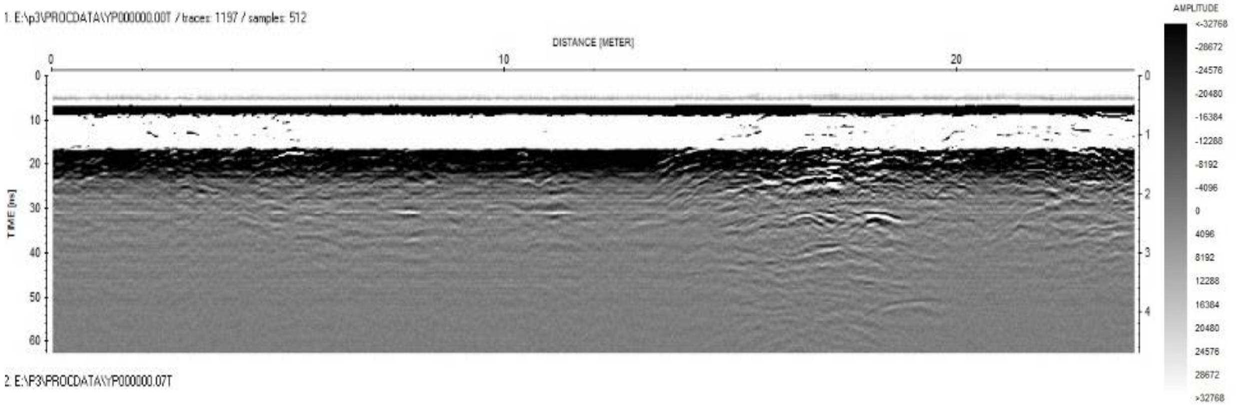
۴-۴- پردازش و تفسیر پروفیل ۳

پروفیل ۳ برداشت شده در محدوده مورد مطالعه با استفاده از آنتن فرستنده با فرکانس مرکزی ۳۰۰ مگاهرتز و از نوع پوششی برداشت شده است. طول این پروفیل ۲۴ متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، پروفیل ۳ را به علامت P3D نشان داده شده است. مقطع خام به دست آمده از پروفیل سوم در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. هیچ گونه فیلتری بر مقطع نشان داده شده در این شکل اعمال نشده است.



شکل ۴-۳: مقطع خام GPR پروفیل ۳

اولین پردازشی که بر روی مقطع خام این پروفیل اعمال می‌شود، فیلتر Dewow است که به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین بر روی داده‌ها اعمال شد. مقدار پنجره زمانی ۱۰ نانوثانیه در این پردازش در نظر گرفته شده است. نتیجه حاصل از اعمال فیلتر Dewow بر روی داده‌های GPR این پروفیل در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۳

در مرحله بعد تصحیح صفر زمانی بر روی داده‌ها انجام شد. با اعمال این تصحیح بر روی داده‌ها بازتاب-کننده‌ها در راستای قائم جابجا شده و در مکان واقعی خود قرار گرفته و با توجه به قرار گرفتن سطح زمین در عمق صفر، تخمین عمق بازتاب‌کننده‌ها با دقت بیشتری امکان‌پذیر می‌شود.

در این مرحله از فیلتر میان‌گذر،که ترکیبی از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر می‌باشد، استفاده شد. این فیلتر اجازه عبور محدوده معینی از فرکانس را می‌دهد. این محدوده معین فرکانس به وسیله تعیین چهار فرکانس، مشخص می‌شود. این فیلتر به منظور ایزوله کردن[1] قسمت معینی از داده‌ها به کار می‌رود؛ که نوفه‌های فرکانسی بالا و پایین را حذف می‌کند و یک فیلتر مناسب و پرکاربرد در روش GPR است.

در ادامه روند پردازش در این مرحله فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها اعمال شد. این فیلتر نوفه‌های زمینه و بازتابنده‌های کم‌شیب را حذف می‌کند و همچنین بازتاب‌های ریز مخصوصاً در اعماق کم را بهتر نمایش می‌دهد. استفاده از از این فیلتر در موارد پراتلاف (مانند خاک‌های مرطوب) یک مرحله مهم و کلیدی در پردازش و تفسیر داده‌های GPR می‌باشد. همچنین با استفاده از این فیلتر، سعی شد تا اثرات عواملی که در طول عملیات برداشت، منجر به ایجاد نوفه شدند؛ به حداقل برسد.

بعد از مرحله بالا از کنترل بهره‌ی اتوماتیک (AGC) به منظور افزایش توان سیگنال در اعماق زیاد استفاده شده است.

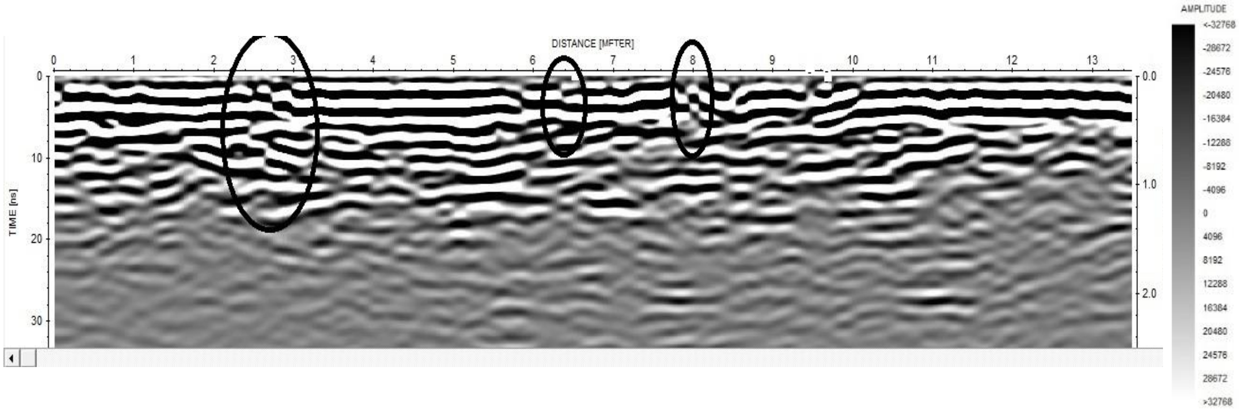
در این مرحله به منظور حذف اثر جهت‌گیری منبع وگیرنده بر روی بازتاب‌کننده‌ها و توزیع هندسی سطح آنها از فیلتر مهاجرت f-k با مقدار سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد.

در مرحله آخر از فیلتر میانگین متحرک[2] استفاده شد؛ که به منظور حذف نوفه‌های موجود و هموارسازی

---

[1] isolation
[2] Running Average

روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت، نتیجه اعمال این فیلتر بر روی مقطع GPR پروفیل ۳ در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۵: مقطع نهایی GPR پروفیل ۳ پس از اعمال تمامی پردازش‌های بالا

با توجه به مقطع مشاهده شده پس از اعمال پردازش‌های لازم و گفته شده، همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود ۳ ناحیه را با بیضی مشکی رنگ که به ترتیب به صورت بزرگ و کوچک و متوسط مشخص شده و همچنین با توجه به مشاهدات صحرایی که در شکل ۴-۶ که در پایین آمده است؛ یک سری از شکستگی‌ها قابل رویت هستند؛ که به توضیح آنها در ادامه می‌پردازیم.

همان‌طور که در شکل ۴-۶ عکس (الف) قابل مشاهده است، در فواصل ۲/۵۰ تا ۳ متری از ابتدای پروفیل (با فلش مشکی مشخص شده است)، شکستگی‌ها و به هم ریختگی لایه‌ها قابل رویت هستند؛ که می‌توان آنها را در فواصل ۲/۴۰ تا ۳ متری مقطع GPR این پروفیل در شکل ۴-۵ نیز مشاهده کرد. این شکستگی به وسیله بیضی مشکی بزرگ قابل تشخیص هستند.

همچنین در فواصل ۶/۵۰ و ۸ متری از ابتدای پروفیل هم دو شکستگی به صورت عمودی وجود دارد؛ که در شکل ۴-۶ عکس (ب) قابل مشاهده هستند. این شکستگی‌ها در داخل مقطع GPR این پروفیل (شکل

(۴-۵)) نیز به ترتیب با بیضی‌های مشکی کوچک و متوسط در فواصل ۶/۵ و ۸ متری این مقطع قابل تشخیص هستند.

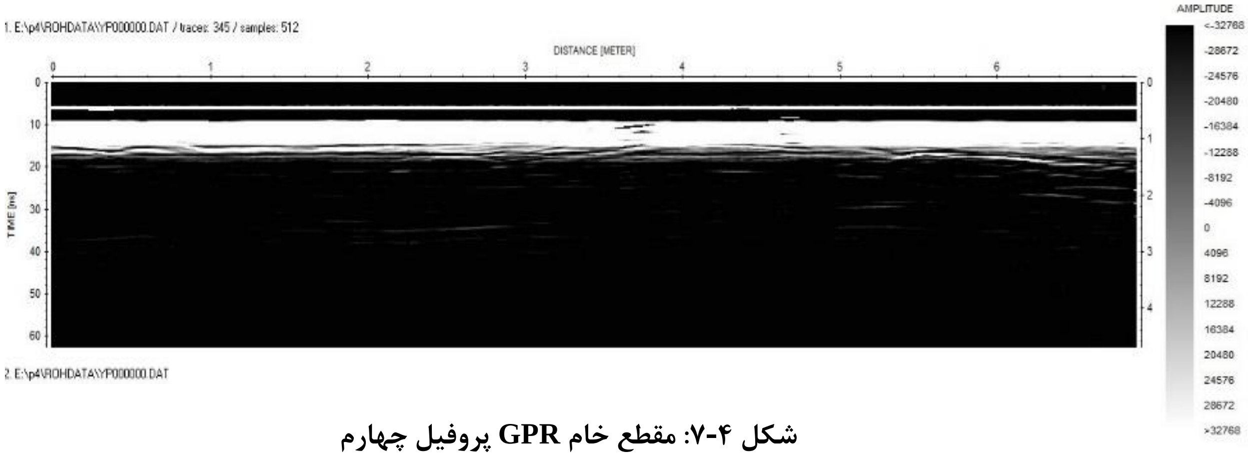
الف

ب

شکل ۴-۶: شکستگی‌های موجود در پروفیل سوم که (الف) مربوط به شکستگی ابتدای پروفیل و (ب) مربوط به شکستگی‌های وسط پروفیل می‌باشد.

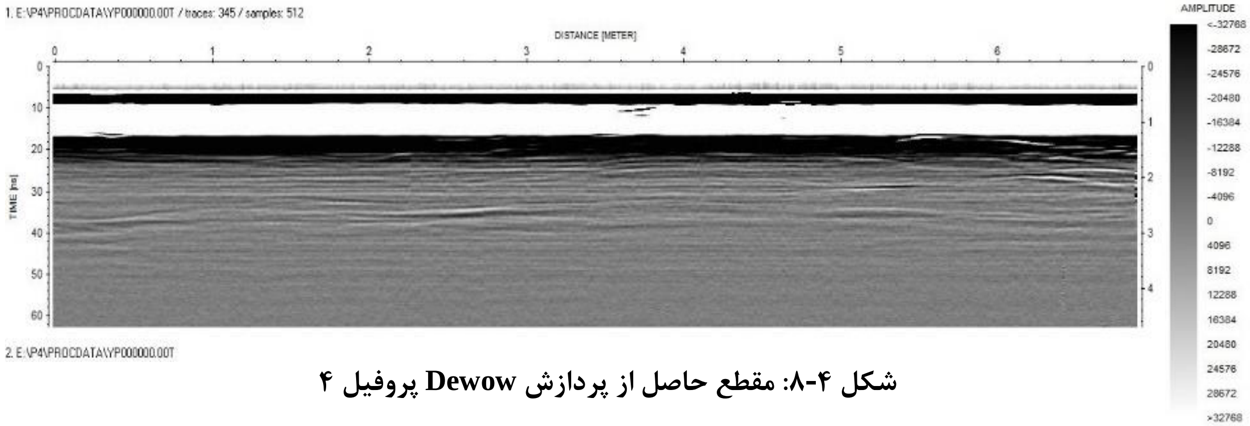
۴-۵- پردازش و تفسیر پروفیل ۴

طول این پروفیل ۷ متر می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، پروفیل ۴ را با علامت P4D نشان داده‌ایم. مقطع خام بدست آمده از پروفیل چهارم در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. بر روی این مقطع هیچ گونه فیلتری اعمال نشده است.



شکل ۴-۷: مقطع خام GPR پروفیل چهارم

باز هم اولین پردازشی که بر روی این مقطع اعمال می‌شود، فیلتر Dewow است که به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین بر روی داده‌ها اعمال شده است. که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود.



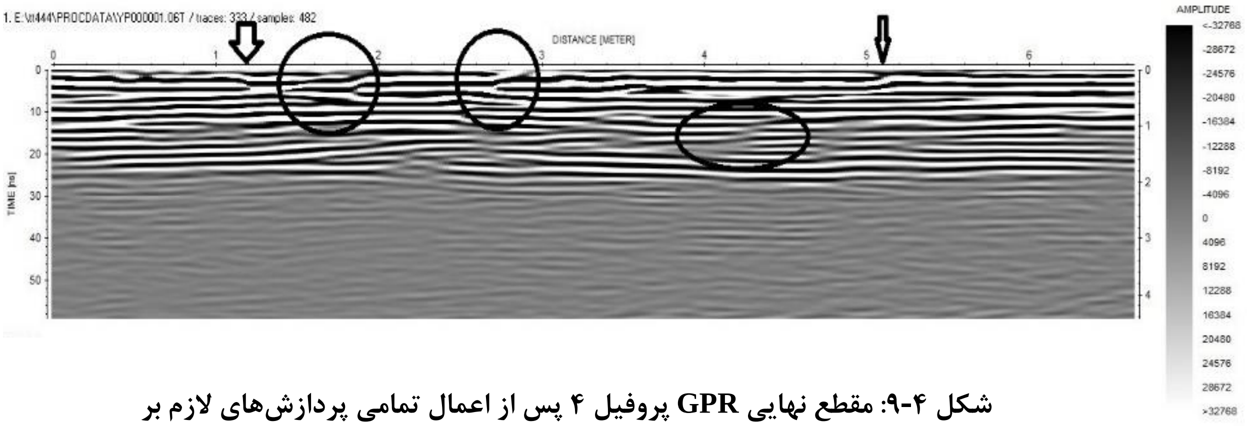
شکل ۴-۸: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۴

در مرحله بعد تصحیح صفر زمانی بر روی داده‌ها انجام شده است و بعد از آن از فیلتر میان‌گذر،که ترکیبی از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر می‌باشد، استفاده شده است.

در این مرحله فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها اعمال شد. با استفاده از این فیلتر، سعی بر آن شد تا

اثرات عواملی که در طول عملیات برداشت، منجر به ایجاد نوفه شدند به حداقل برسد.

بعد از مرحله بالا از کنترل بهره‌ی اتوماتیک (AGC) و سپس از فیلتر مهاجرت f-k با مقدار سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد. در مرحله آخر از فیلتر میانگین متحرک استفاده شد که به منظور حذف نوفه‌های موجود و هموارسازی کردن روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه اعمال این این پردازش‌ها بر روی داده‌های GPR این پروفیل در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۹: مقطع نهایی GPR پروفیل ۴ پس از اعمال تمامی پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها

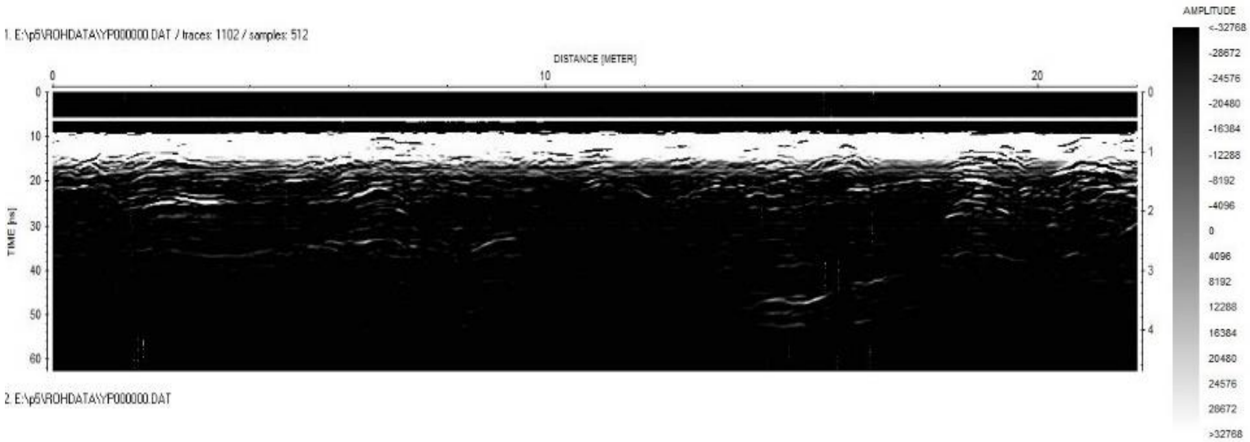
همان‌طور که از شکل ۴-۹ که مقطع نهایی حاصل از پردازش‌ها می‌باشد، مشاهده می‌شود دو بیضی مشکی رنگ که به طور عمودی از ابتدایی پروفیل بر روی مقطع قرار گرفته‌اند یک به هم ریختگی را در لایه‌ها نشان می‌دهد به طوری که لایه‌ها از حالت موازی خارج شده‌اند. با توجه به مشاهدات صحرایی صورت گرفته، مربوط به محل شکستگی است. همچنین در فاصله ۴ تا ۴/۵۰ متری از ابتدای پروفیل در عمق ۱/۵۰ متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین که با بیضی مشکی رنگ به صورت افقی قرار گرفته است، لایه بندی در این مناطق در رادارنگاشت مشاهده نمی‌شود که این ناشی از به هم ریختگی لایه‌ها در این مناطق است. با توجه به مشاهدات صحرایی می‌توان گفت این قسمت بر اثر نیروهای تکتونیکی دچار شکستگی شده

است.

در شکل ۴-۹ دو قسمت از مقطع با فلش مشکی رنگ در فواصل ۱/۲۰ و ۵ متری از ابتدای پروفیل قرار گرفته اند که در یک بازه طولی کوتاهی نشان از این است که در این قسمت‌ها شیب لایه‌ها تغییر کرده است.

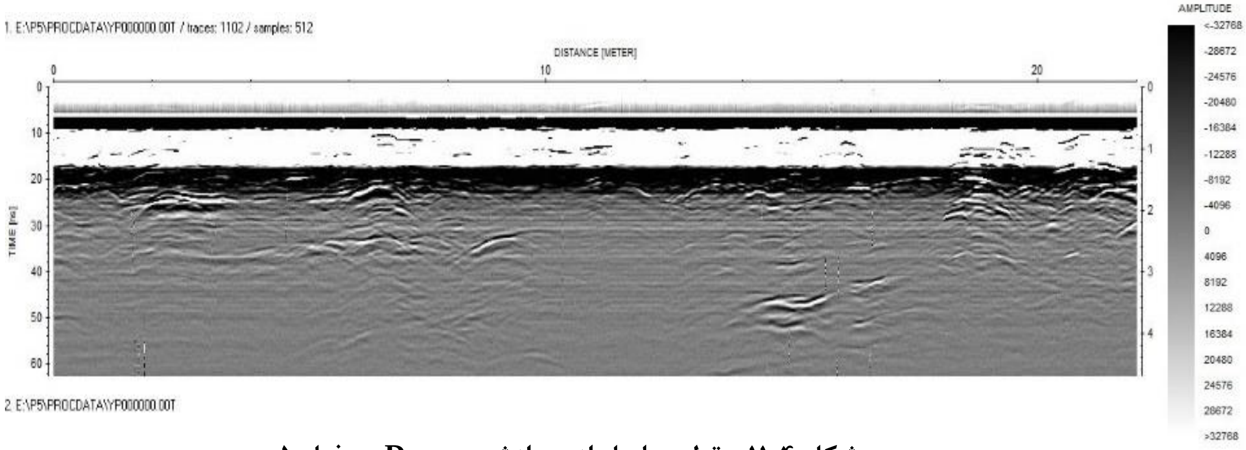
۴-۶- پردازش و تفسیر پروفیل ۵

طول این پروفیل ۲۲ متر می‌باشد. در شکل ۴-۱ پروفیل ۵ را به علامت P5D نشان داده شده است. مقطع خام به دست آمده از پروفیل ۵ در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. این مقطع هیچ گونه فیلتری بر آن اعمال نشده است.



شکل ۴-۱۰: مقطع خام پروفیل ۵

دوباره اولین پردازشی که بر روی مقاطع اعمال می‌شود، فیلتر Dewow است که به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین بر روی داده‌ها اعمال شد. مقطع حاصل از اعمال این فیلتر در شکل ۴-۱۱ آورده شده است.

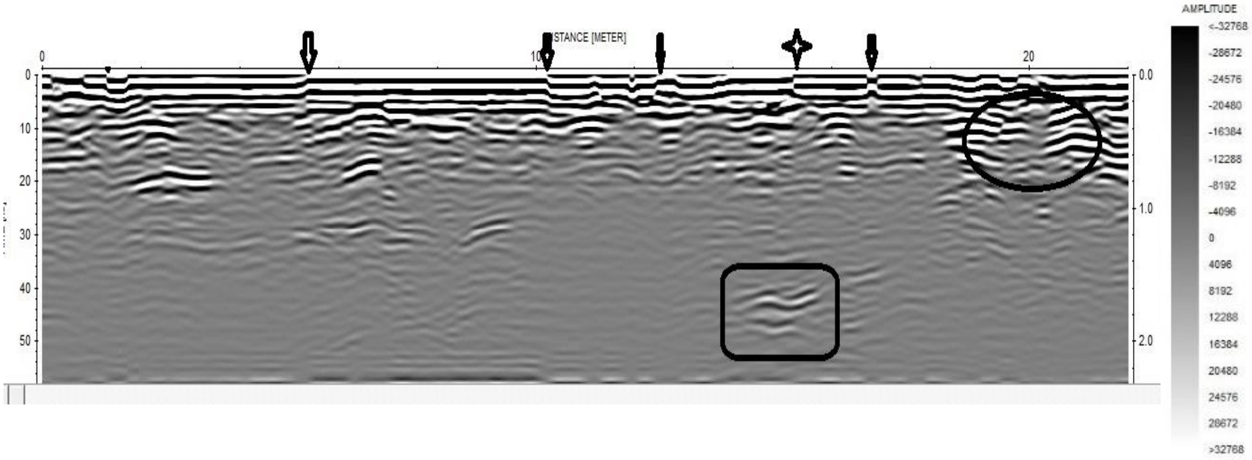


شکل ۴-۱۱: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۵

مانند مراحل پردازش دو پروفیل قبلی، مرحله تصحیح صفر زمانی بر روی داده‌های GPR این پروفیل نیز انجام شد. و بعد از آن از فیلتر میان‌گذر، همان‌طور که در پروفیل‌های قبلی توضیح داده شد، استفاده کردیم. این فیلتر اجازه عبور محدوده معینی از فرکانس را می‌دهد.

سپس فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها اعمال شد. تا اثرات عواملی که در طول عملیات برداشت، منجر به ایجاد نوفه شدند به حداقل برسد.

بعد از مرحله بالا از کنترل بهره‌ی اتوماتیک (AGC) و سپس از فیلتر مهاجرت f-k با مقدار سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد. در مرحله آخر از فیلتر میانگین متحرک استفاده شد که به منظور حذف نوفه‌های موجود و هموارسازی کردن روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقطع حاصل از اعمال این پردازش‌ها بر روی داده‌های GPR پروفیل ۵ در شکل ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱۲: مقطع نهایی GPR پروفیل ۵ پس از اعمال تمامی پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها

بر روی مقطع GPR پروفیل ۵ (شکل ۴-۱۲)، یک بیضی، مستطیل و فلش‌های رسم شده‌اند که هر یک محل بی‌هنجاری‌هایی را نشان می‌دهند که در ادامه توضیح داده شده اند.

عکسی از محل پروفیل ۵ در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. در این شکل، بی‌هنجاری‌ها با دو فلش مشکی رنگ (عمودی و افقی) و یک فلش طوسی رنگ مشخص شده‌اند.

شکل ۴-۱۳: عکس مربوط به قسمتی از سینه کار پروفیل ۵

همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود، چهار فلش مشکی رنگ در فواصل ۵/۴۰ متری ، ۱۰/۲۰

متری ، ۱۲/۳۰ متری و در ۱۷ متری از ابتدای پروفیل مشخص شده‌اند، روند لایه‌ها از حالت منظم خارج شده و تغییر کرده است که با توجه به مشاهدات صحرایی و شکل ۴-۱۳ فلش طوسی رنگ در عکس نمایان‌گر آنومالی است که در مقطع نهایی در فاصله ۱۲/۳۰ متری از ابتدای پروفیل که با فلش مشکی مشخص شده است، می‌باشد. در این قسمت از سینه کار با برش‌های که در بلوک سنگ صورت گرفته، لبه‌های بلوک‌ها به صورت سه کنج در آمده است که در این لبه‌ها جهت لایه‌ها عوض شده است که در مقطع نهایی یا همان شکل ۴-۱۲ قابل رویت می‌باشد و به همین ترتیب، بقیه فلش‌های مشکی هم، همین بی‌هنجاری را که در بلوک‌های دیگر پروفیل که در عملیات صحرایی دیده می‌شد را نشان می‌دهند.

علامت ستاره در شکل ۴-۱۲ که در فاصله ۱۵/۳۰ متری از ابتدای پروفیل قرار گرفته، نشانگر فلش مشکی هست که در شکل ۴-۱۳ به صورت عمودی قرار گرفته است که در این قسمت در عکس تغییر شیب لایه مشخص است، که در مقطع نهایی نیز قابل رویت می‌باشد.

در شکل (۴-۱۳) یک حفره‌ی به نسبت بزرگی در وسط سینه کار مشاهده می‌شود، که با فلش مشکی رنگ به صورت افقی مشخص شده است که این حفره را می‌توان در شکل ۴-۱۲ در داخل کادر مربع مشکی رنگ، در عمق ۲ متری از سطح مشاهده کرد.

همچنین در فاصله ۲۰ متری از ابتدای پروفیل، در نزدیکی سطح برداشت، نبود لایه‌بندی در رادارنگاشت ناشی از به هم ریختگی و خرد شدن لایه‌ها دیده می‌شود که در مشاهدات صحرایی، مربوط به محل شکستگی است که در شکل ۴-۱۲ با دایره مشکی رنگ مشخص شده است.

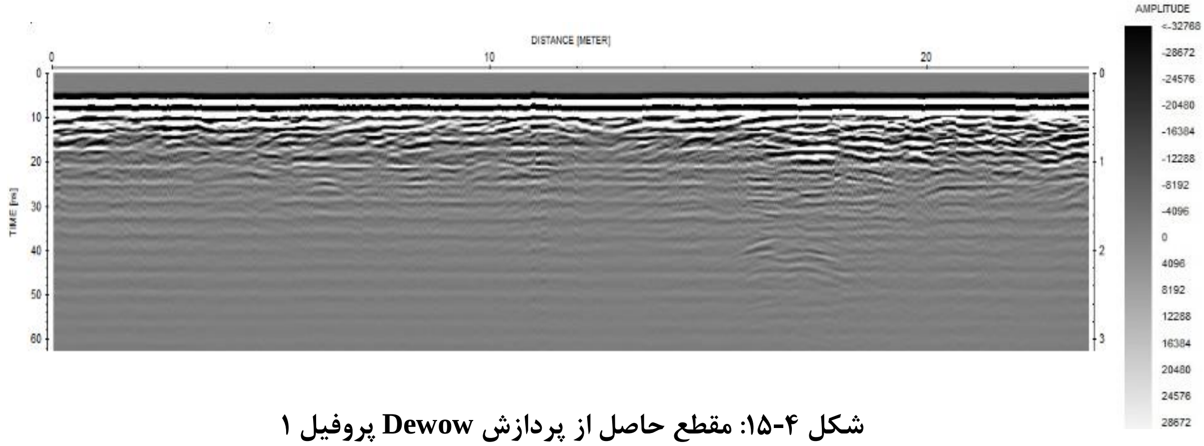
حال همان طور که در ابتدای شروع به تفسیر پروفیل ها گفتیم، به سراغ دو پروفیل ۱ و۲ که بر خلاف پروفیل‌های دیگر بر روی کف زمین برداشت کردیم، می‌رویم.

۴-۷- پردازش و تفسیر پروفیل ۱

پروفیل ۱ نیز با استفاده از آنتن ۳۰۰ مگاهرتزی از نوع پوششی برداشت شده است. طول این پروفیل ۲۴ متر می‌باشد که همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، پروفیل ۱ را با علامت P1D نشان داده شده است. مقطع خام بدست آمده از پروفیل اول در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. بر روی این مقطع هنوز هیچ فیلتر و پردازشی صورت نگرفته است.

شکل ۴-۱۴: مقطع خام GPR پروفیل ۱

اولین پردازشی، فیلتر Dewow است که به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین بر روی داده‌ها اعمال شد. که در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۵: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۱

در مرحله بعد تصحیح صفر زمانی را بر روی داده‌ها انجام دادیم. با اعمال این تصحیح بر روی داده‌ها بازتاب‌کننده‌ها در راستای قائم جابجا شده و در مکان واقعی خود قرار گرفته و با توجه به قرار گرفت سطح زمین در عمق صفر، تخمین عمق بازتاب‌کننده‌ها با دقت بیشتری امکان‌پذیر می‌شود.

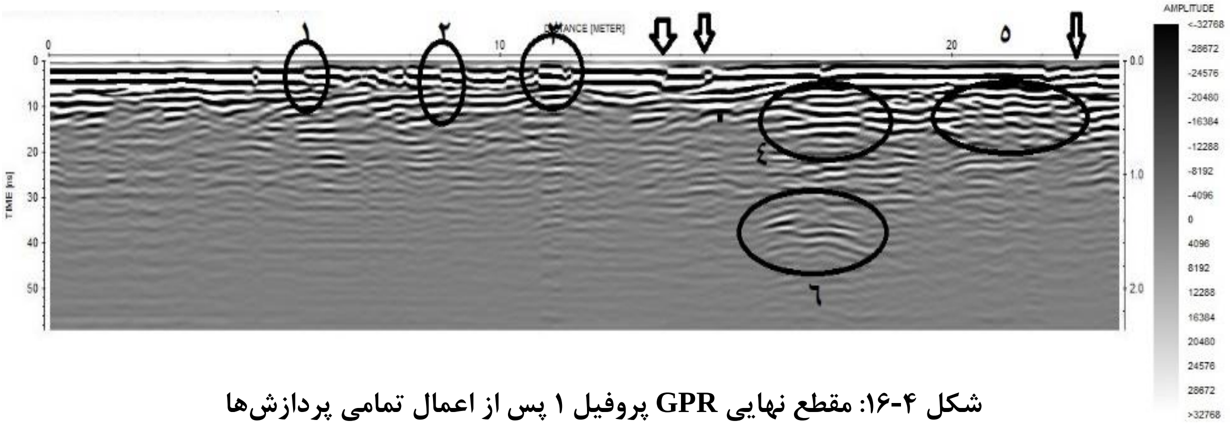
بعد از مرحله بالا فیلتر میان‌گذر،که ترکیبی از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر می‌باشد، استفاده کردیم. در پروفیل سوم توضیحاتش به طور کامل داده شده است.

در ادامه روند پردازش در این مرحله فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها اعمال شد. این فیلتر نوفه‌های زمینه و بازتابنده‌های کم‌شیب را حذف می‌کند و همچنین بازتاب‌های ریز مخصوصاً در اعماق کم را بهتر نمایش می‌دهد. استفاده از از این فیلتر در موارد پراتلاف (مانند خاک‌های مرطوب) یک مرحله مهم و کلیدی در پردازش و تفسیر داده‌های GPR می‌باشد. همچنین با استفاده از این فیلتر، سعی بر آن شد تا اثرات عواملی که در طول عملیات برداشت، منجر به ایجاد نوفه شدند به حداقل برسد.

بعد از مرحله بالا از کنترل بهره‌ی اتوماتیک (AGC) به منظور افزایش توان سیگنال در اعماق زیاد استفاده شده است.

در این مرحله به منظور حذف اثر جهت‌گیری منبع وگیرنده بر روی بازتاب‌کننده‌ها و توزیع هندسی سطح آنها از فیلتر مهاجرت f-k با مقدار سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد.

در مرحله آخر از فیلتر میانگین متحرک استفاده شد که به منظور حذف نوفه‌های موجود و هموارسازی کردن روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۶: مقطع نهایی GPR پروفیل ۱ پس از اعمال تمامی پردازش‌ها

شکل ۴-۱۷: راستای برداشت پروفیل اول

قبل از شروع تفسیر پروفیل اول گفتن این نکته ضروری است که پروفیل‌های اول و دوم بر روی سطح معدن برداشت شد [شکل ۴-۱۷]، که هیچ نیمرخی مانند پروفیل سوم و چهارم و پنجم برای بررسی شکستگی‌ها وجود نداشت، به همین دلیل این دو پروفیل را در آخر مورد بررسی قرار دادیم تا بتوانیم تفسیر مناسب‌تری را انجام دهیم.

همانطور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود، قسمت‌های که با شماره‌های ۱ و ۲ و ۳ با علامت بیضی مشکی رنگ در حالت عمودی، علامت‌گذاری شده که به دلیل جابه‌جایی لایه‌ها، احتمال وجود شکستگی در این مناطق وجود دارد. همچنین قسمت‌های که با شماره ۴ و ۵ با بیضی مشکی رنگ به صورت افقی علامت گذاری شده، لایه‌ها دچار یک سری اعوجاجاتی شده‌اند که احتمال شکستگی در این قسمت‌ها وجود دارد که احتمالا ناشی از فشارهای تکتونیکی می‌باشد. شکستگی‌ها به این موارد گفته ختم نمی‌شود، بلکه احتمال وجود این شکستگی‌ها در بین شماره ۱ و ۲ و همچنین بین ۳ و ۴ نیز وجود دارد.

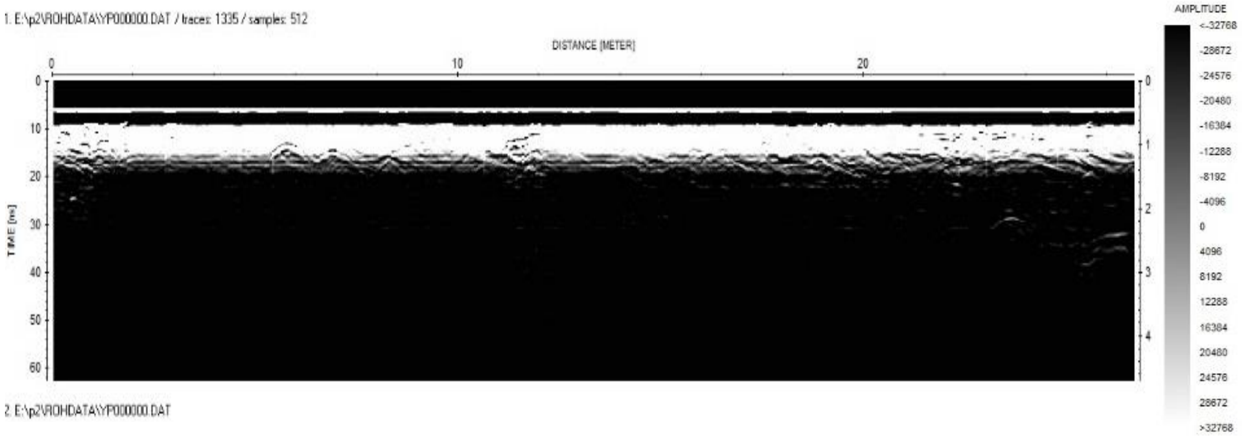
این‌های که مشخص شده بی‌هنجاری‌ها بارزی هستند که GPR می‌تواند این بی‌هنجاری‌ها را نشان بدهد، ولی فقط به این شکستگی‌ها اکتفا نمیشه کرد، احتمالا در قسمت‌های که با فلش مشکی رنگ مشخص شده است، شکستگی وجود داشته باشد.

در مقطع نهایی شکل ۴-۱۶، قسمتی از مقطع با دایره مشکی رنگ که به صورت افقی با شماره ۶ مشخص شده است، که با توجه به شکل ۴-۱۲ که مربوط به مقطع نهایی پروفیل ۵ می‌باشد، در قسمتی از مقطع که با کادر مربع شکل مشکی مشخص شده، بی‌هنجاری نمایان است که همان‌طور که توضیح داده شده، این بی‌هنجاری مربوط به یک حفره بزرگ بود که در شکل ۴-۱۳ قابل رویت می‌باشد. حال با توجه به این نتیجه‌ی گرفته شده در پروفیل ۵، چون بی‌هنجاری مربوطه در پروفیل ۱ مشابه بی‌هنجاری پروفیل ۵

می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که احتمال یک حفره یا شکستگی بزرگ مانند آنچه در شکل ۴-۱۳ نمایان است، در پروفیل ۱ در عمق وجود داشته باشد.

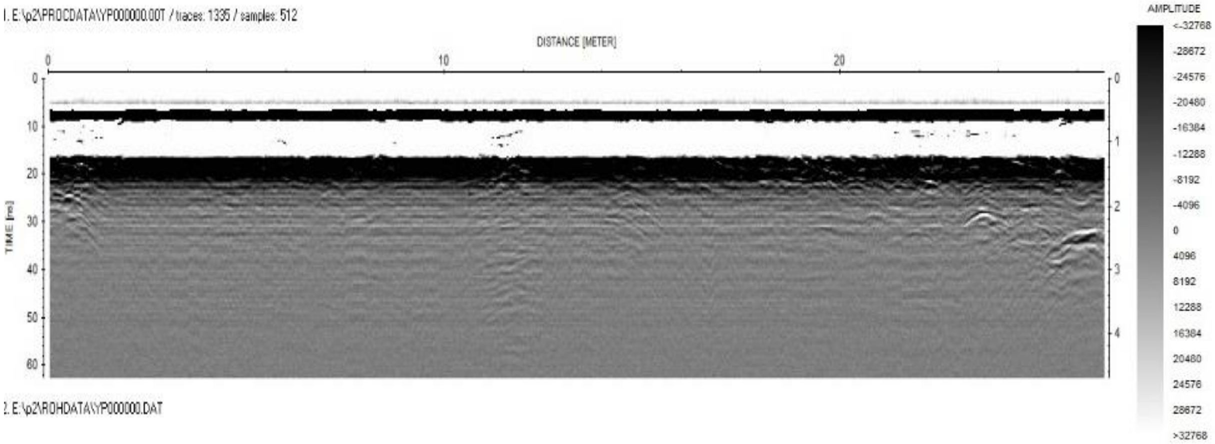
۴-۸- پردازش و تفسیر پروفیل ۲

پروفیل ۲ نیز با استفاده از آنتن ۳۰۰ مگاهرتزی از نوع پوششی برداشت شده است. طول این پروفیل ۲۷ متر می‌باشد که همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، پروفیل ۲ را با علامت P2D نشان داده شده است. مقطع GPR بدست آمده از پروفیل ۲ بدون اعمال هیچ گونه فیلتری در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۸: مقطع GPR خام پروفیل ۲

فیلتر Dewow به منظور حذف نوفه‌های فرکانس پایین بر روی داده‌ها اعمال شد. که در شکل ۴-۱۹ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۹: مقطع حاصل از پردازش Dewow پروفیل ۲

در مرحله بعد تصحیح صفر زمانی و فیلتر میان‌گذر،که ترکیبی از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر می‌باشد، استفاده کردیم.

در ادامه روند پردازش در این مرحله فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها اعمال شد. با استفاده از این فیلتر، سعی بر آن شد تا اثرات عواملی که در طول عملیات برداشت، منجر به ایجاد نوفه شدند به حداقل برسد.

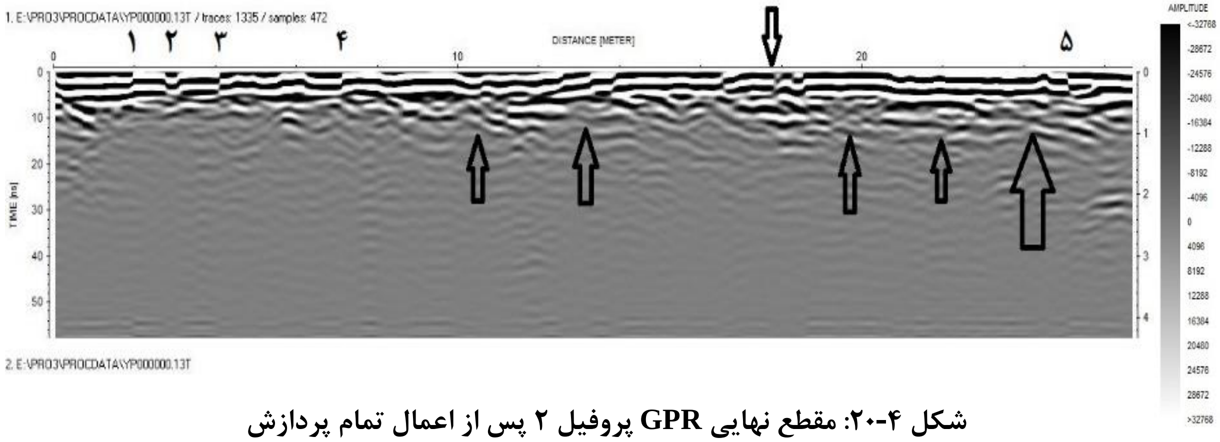
بعد از مرحله بالا از کنترل بهره‌ی اتوماتیک (AGC) به منظور افزایش توان سیگنال در اعماق زیاد استفاده شده است.

در این مرحله به منظور حذف اثر جهت‌گیری منبع وگیرنده بر روی بازتاب‌کننده‌ها و توزیع هندسی سطح آنها از فیلتر مهاجرت f-k با مقدار سرعت ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد.

در مرحله آخر از فیلتر میانگین متحرک با مقدار ردهای میانگینی[۱] ۵ استفاده شد، که به منظور حذف نوفه‌های موجود و هموارسازی کردن روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۴-۲۰ مشاهده

[۱] Average trace

می‌شود.



شکل ۴-۲۰: مقطع نهایی GPR پروفیل ۲ پس از اعمال تمام پردازش

با توجه به مقطع مشاهده شده پس از اعمال پردازش‌های لازم و گفته شده، همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود در فاصله ۲ متری از ابتدای پروفیل در نقطه‌ی ۱ به علت جابه‌جایی لایه‌ها، می‌توان احتمال شکستگی را در این قسمت داد و به همین ترتیب در نقاط ۲ و۳ و۴ و۵ نیز می‌توان این احتمال شکستگی‌ها را مشاهده کرد. در فاصله ۴ تا ۷ متری از ابتدای پروفیل، لایه‌ها دچار اعوجاجاتی شده‌اند که احتمالا ناشی از فشارهای تکتونیکی می‌باشد، که این روند همچنین از ۱۰ تا ۱۴ متری و همچنین از ۱۶/۵ تا ۱۸/۵ متر قابل مشاهده است.

در عمق ۶۰ سانتی‌متری تا ۱ متری از سطح زمین همان‌طور که در مقطع شکل (۴-۲۰) مشاهده می‌شود، از فاصله ۱ متری ابتدای پروفیل تا انتهای پروفیل (مکان‌های که با علامت فلش مشخص شده است) به صورت تیکه، تیکه لایه بندی‌ها در رادارنگاشت مشاهده نمی‌شود که احتمالا ناشی از به هم ریختگی لایه‌ها در این مناطق است. احتمال وجود اثر نیروهای تکتونیکی در این نقاط زیاد است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

بالا بودن قدرت تفکیک و سرعت بالای برداشت داده‌ها در روش GPR، سبب شده است که استفاده از این روش بر روی معادن سنگ تزیینی برای بررسی درزه و شکستگی‌های سنگ مفید واقع شود.

به طور کلی می‌توان نتایج مربوط به ۵ پروفیل مورد بررسی در این پایان نامه را به صورت زیر نوشت:

۱- با استفاده از پردازش‌های صورت گرفته در پروفیل‌ها، مشاهده شد که در بعضی از قسمت‌های پروفیل‌ها جهت شکستگی‌ها در مقطع مشاهده می‌شد.

۲- حفره‌ها و شکستگی‌های به نسبتا بزرگ در بلوکه‌های سنگ در مقطع های پردازش شده به وضوح مشاهده می‌شد.

۳- در مناطقی که سنگ آهک به طور فشرده باشد و در آن شکستگی یا خردشدگی لایه‌ها اتفاق نیفتاده باشد، عمق نفوذ افزایش می‌یابد ولی در صورت وجود شکستگی یا خرد شدگی لایه، عمق نفوذ دچار کاهش می‌شود.

۴- می‌توان از این روش برای شناسایی شکستگی‌های توده‌های معدنی و سنگ‌های تزیینی و نما به شیوه اقتصادی در معدنکاری و مسائل معدنی استفاده نمود.

۵-۲- پیشنهادات

۱- برای افزایش دقت و وضوح بیشتر از آنتن‌های با فرکانس بالاتر برای افزایش بیشتر تفکیک‌پذیری استفاده شود.

۲- در مطالعات آینده، در کنار مطالعه داده‌های ۲ بعدی، مطالعاتی در زمینه نحوه‌ی صحیح داده‌برداری، پردازش و تفسیر داده‌های ۳ بعدی صورت بگیرد.

منابع و مآخذ

افرا م ،کامکار روحانی ا،(۱۳۸۹)،"پردازش وتفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی حفره‌های زیر زمینی در منطقه بسطام"،چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

اویسی موخر م،(۱۳۸۶) ،"بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار"، مجله ژئوفیزیک ایران،جلد ۱، شماره ۱، ۱۳۸۶، ص ۸۱-۸۹.

اویسی موخر. م، قاسمی. و، و شاه‌نظری. ح، (۱۳۸۴)، مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین، دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، ۱۳۲-۱۲۹.

بادپا م، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد:" به کارگیری روشهای مغناطیس هوابرد، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در بررسی گسل‌ها و ناپیوستگی‌های خلیل‌شهر"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

پرنو س، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد:" پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های GPR به منظورتعیین عمق، ضخامت ومحدوده جانبی یخچال‌ها در منطقه علم کوه مازندران"، دانشکده مهندسی معدن،نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

حسینی م، (۱۳۹۵)، " آشکارسازی دقیق تأسیسات زیرسطحی شهری با برداشت و مدلسازی دوبعدی و سه بعدی داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) ،مطالعه موردی :دانشگاه صنعتی شاهرود"، نشریه‌ی پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره2 ، شماره2 ،ص۶۷-۷۶.

رشمه کریم، ا.، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد :" کاربرد روش های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین(GPR) و توموگرافی مقاومت ویژه (ERT) در کاوش های باستان شناسی، مطالعه موردی تپه حصار دامغان" ،دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

شکری م، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد:" بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مصری ا،(۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد:"بررسی طبقه‌بندی توصیفی خاک‌ها و تشخیص مناسب بودن آن‌ها از نظر کشاورزی با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین(GPR)- مطالعه موردی مزرعه کشاورزی بسطام"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدی س، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد:" کوچ اشعه گاوسی با استفاده از روش دنبال کردن پرتوی مختلط در حوزه عمق"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدی ویژه م، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه ارشد:" برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه‌ی شاهرود و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه‌ی مزبور"، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مدنی ح.، (۱۳۷۶) "اصول پی‌جویی، اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی"، چاپ سوم، انتشارات موسسه فرهنگی انتشاراتی خانه فرهنگ.

Annan, A. P, 2009, Electromagnetic principles of ground penetrating radar, In Ground penetrating radar: theory and applications: Jol HM (ed). Elsevier: Amsterdam; 3-40.

Annan A. P. (2001) “Ground penetrating radar workshop note” :sensors and software.

Chin-Shung y and Szu-Pyng k., (2000), "Twelve different interpolation methods ", A case study of Surfer 8.0.

Cassidy NJ. 2009. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In Ground penetrating radar: theory and applications, Jol HM (ed). Elsevier: Amsterdam; 141-176

Daniels D. J.(2004) “Ground penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers”, The Institution of Electrical Engineers, Londo,United Kingdom, 75-84, and455-460.

Dojack, L. (2012). Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists, University of British Columbia

Eder K., Reidler C., Mayer C.Leopold M. (2008) “Crevasse detection in Alpien areas using ground penetrating radar as a component for a mountain gulde system, The International Archives of the Photogrammetry” Remote Sensing and Spatial Inf. Sci., 37, 838-839.

Fisher, S.C., Stewart, R.R., Jol, H.M., 1996. Ground penetrating radar (GPR) data enhancement using seismic techniques. J. Environ. Eng. Geophys. 1, 89–96.

Grandjean. G., and J.e. Gourry. J.e., (1996), "GPR Data Processing for 3D Fracture Mapping in a Marble Quarry (Thassos, Greece), " Journal of Applied Geophysics, vol 36,

19-30.

Howe, A., 2000, PhD.thesis,” Ground penetrating radar for the parameterization of subsurface hydrological properties”, Geography. depart. King,s College London.

Jol H. M.(2009) “Ground Penetrating Radar: Theory and Applications”, Oxford: Elsevier Science, 6-32.

Jol HM and Bristow CS. 2003. GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In Ground penetrating radar in sediments, Bristow CS and Jol HM (eds). Geological Society: London, Special Publication 211; 9-28.

KadlOglu. S., (2008), "Photographing the Thicknesses and Discontinuities of a Marble Quarry with 3D GPR visualization ".

Knödel K., Lange G. and Voigt H.J. (2007), “Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies”, In. Blindow N., Eisenburger D., Illich B., Petzold -H. and Richter, T. (Aut), Book part 4: Ground Penetrating Radar, 283-284, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Knödel K., Lange G. and Voigt H. J., (2007), "Environmental geology: Handbook of field methods and case studies", Vol. 1, First Edition, Springer, Heidelberg, pp.206.

Luodes. H., (2008), "Natural stone assessment with ground penetrating radar," Journal of Earth Sciences, 57, 3, 149-155.

Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology, principles, problems and progress. Earth-science Reviews, 66, 261-330.

Ogretmen. Z., and Seren. A., "Investigation fracture–crack systems with geophysical methods in Bayburt Kiratli travertine," GPR2014: 15th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar (Brussels, 30 June–4 July)

Parasnis, D. H, 1997, Principles of applied geophysics, Fifth edition, chapman and Hall, London.

Pervin, S. (2015). Investigation of dielectric properties of rocks and minerals for GPR data interpretation, University of Alberta, 36.

Porsani. L.J., Sauck. W.A., and Junior. AO. S., (2006), "GPR for Mapping Fractures and

as a Guide for Extraction of Ornamental Granite from a Quarry: a Case Study from Southcrn Brazil," Journal of Applied Geophysics, 58, 177- 187.

Powers M.H. (1997) “Modeling frequency-dependent GPR”, The Leading Edge (Tulsa OK), November, 16, no.11, 1657-1662.

Reynolds J.M., (1997), "An introduction applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons Ltd, pp.418-580.

Rey. J., Martinez. J., Vera. P., Ruiz. N., Canadas. F., Montiel. V., (2015), "Ground-penetrating radar method used for the characterisation of ornamental stone quarries," Journal Construction and Building Materials, vol 77, 439–447.

Sato, M. (2009). Principles of mine detection by ground-penetrating radar. Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining, Springer: 19-26.

Sensors and software, 1999, Ground penetrating radar survey design.

Steven, A. Arcone., Daniel, E. Lawson. And Allan, J. Delaney. (1995) “Short-pulse radar wavelet recovery and resolution of dielectric contrasts within englacial and basal ice of Matanuska Glacier, Alaska, U.S.A” J. of Glaciology., 137, 41, 68-86

Van Dam, R. L. and Schlager, W., 2000,"Identifying causes of ground-panetrating radarreflections using time-domain reflectometryand sedimentological analyses ,Sedimentology", 47, 435-449.

Van Overmeen, R. A, 1994, Georadar for hydrogeology: First break, 8 401-408.

Abstract

The Ground penetrating radar method is a powerful high resolution electromagnetic technique that is used for investigation of substructure structures, such as faulting, sedimentary stratigraphy, detection of cavities, shallow investigation of fractures in decorative stone, detection of burial bodies in archeology, and so on. Investigation of stone using the GPR method is definitely not a new method because the first case studies are back to the 1970s. Vast research activities for investigation of stones have only begun in the last decade. The GPR method is a fast and suitable research method for the evaluation of natural stones, but the geological and geophysical features of stone should already be explored to help interpretion results. In this research, after preliminary geological studies of the travertine mine area in Cheshmeh Ali region, in the northwest of Damghan City, the study of joints and fractures in the stone blocks using GPR method, has been made by acquiring the GPR data along 5 survey lines having different lengths. Three survey lines have been considered above the stone wall and tow survey lines have been considered on the surface of stone without having wall.

The GPR data acquision has been made using a shielded transmitter having central frequency of 300 MHz. After GPR data acquision, the data have been processed using Reflexw software. The results show that the GPR method can be used to detect the fractures and their properties, such as their direction and dip, shallow depths.

Key words: Joint and fracture, Ground penetrating radar (GPR), Decoration stone mine, Cheshmeh Ali, Damghan.

Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Geoelectric

Investigation of joint and fractures using GPR method in a decoration stone mine: case study; Astaneh mine.

By: **Hadi Mohammadi pirniya**

Supervisors:

Dr. Alireza Arab Amiri

Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani

September 2018