

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده نفت، معدن و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف و ژئوفیزیک

برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی

ساختارهای زیر سطحی در منطقه جنوب شرقی دریاچه خزر

دانشجو

حبیب اله عشقی

استاد راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور

دکتر مجید انصاری جعفری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (ژئوالکترونیک)

شهریور ۱۳۸۹

تقدیم به

# پدر و مادر عزیزم

## تقدیر و تشکر

حمد و سپاس فقط شایسته ذات اوست.

پس از حمد باری تعالی بر خود واجب می‌دانم نسبت به اساتید گران‌قدر خود که در زمان تحصیل در این دانشگاه آنچه نمی‌دانستم به من آموختند، بی‌نهایت قدردان باشم. از جناب آقای دکتر کامکار روحانی به دلیل ایجاد انگیزه در تحقیق و تلاش علمی که برای راهنمایی این پایان‌نامه از هیچ کمکی فروگذاری نکرده و بی‌شک سهم عمده-ای در به پایان رساندن این تحقیق داشته است بی‌نهایت متشکرم. از همه اساتیدی که با خلوص نیت در تلاشند جامعه‌ای متعالی بسازند قدردانی می‌کنم. همچنین از آقای دکتر انصاری که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند، تشکر می‌کنم.

از داوران محترم جناب آقای دکتر آقاجانی و جناب آقای دکتر عرب‌امیری که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند بی‌نهایت سپاسگزارم. از تمامی اساتید و کارمندان دانشکده معدن و همچنین تمامی دوستان گران‌قدر بالاخص آقایان طاهرزاد، روزبهانی، روشنی، لطفی و جعفری و همکلاسی‌های عزیزم که صبورانه مرا تحمل کردند، تشکر می‌کنم. از آقای مهندس امینی و مهندس نادری که در برداشت داده‌ها کمک شایانی کردند نیز متشکرم.

زبان از سپاسی درخور شما عزیزان که مرا یاری فرمودید قاصر است.

امیدوارم که در سایه عنایت‌های الهی همیشه سلامت و پیروز باشید.

حبیب‌اله عشقی

E-mail: habibzheo@gmail.com

## چکیده

رادار نفوذی به زمین یا به طور خلاصه GPR یکی از روش‌های ژئوفیزیکی است که برای آشکارسازی ساختارهای زیر سطحی کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش GPR از امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۲۳۰۰ مگاهرتز) استفاده می‌شود. موفقیت همه روش‌های ژئوفیزیکی وابسته به میزان تباین در مشخصات فیزیکی مورد نظر، در ساختارهای زیر سطحی است. کمیت تعیین کننده در بازتاب امواج الکترومغناطیس از ساختارهای زیر سطحی، گذردهی الکتریکی نام دارد. تفاوت ساختارهای زیر سطحی در جنس، میزان رطوبت، نحوه چینش دانه‌ها، میزان رس، دانه بندی و ... باعث ایجاد تباین در ویژگی‌های الکتریکی (رسانندگی و گذردهی الکتریکی) ساختارهای زیرسطحی می‌شود و به همین دلیل این تغییرات توسط روش GPR قابل بررسی می‌باشند.

امواج الکترومغناطیسی ساطع شده توسط دستگاه GPR در برخورد با ناپیوستگی‌های الکتریکی به واسطه تغییر در گذردهی محیط در دو طرف فصل مشترک، بازتاب می‌شوند. موج بازتابیده از این فصل مشترک توسط دستگاه GPR قابل آشکارسازی است. دستگاه‌های GPR زمان رسیدن رویدادها را اندازه گیری می‌کنند، از این رو بازتاب از ساختارهای زیر سطحی به صورت تابعی از زمان نشان داده می‌شود. برای آن‌که رویدادهای بازتابی پاسخ صحیحی از عمق ساختارهای زیر سطحی باشند، مقادیر ثبت شده زمانی بایستی به عمق صحیح‌شان نسبت داده شوند. این تبدیل با استفاده از توزیع سرعت امواج GPR در ساختارهای زیر سطحی صورت می‌گیرد. در این مطالعه بعد از برداشت داده‌های GPR در منطقه جنوب شرقی دریای خزر، برای تهیه مقاطع عمقی داده‌ها، سرعت سیر امواج رادار در ساختارهای زیر سطحی برابر ۰/۱ متر بر نانو ثانیه در نظر گرفته شد. داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند. دستگاه مذکور از آنتن ۲۵۰ مگاهرتزی برای ارسال پالس‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند.

برای ترسیم مقاطع زمانی و عمقی در ابتدا پردازش‌هایی بر روی داده‌ها انجام شد. به این ترتیب که در ابتدا پردازش Dewow بر روی تمامی داده‌ها اعمال شده و سپس بسته به شرایط بهره‌های AGC و Autogain بر روی داده‌ها اعمال شده و در نهایت هر جا که نشان دادن توالی لایه‌های رسوبی مورد نظر بود از پردازش Envelope استفاده شد. در این مطالعه ابتدا مقاطع زمانی را به دست آورده و سپس با استفاده از تخمین سرعت امواج در ساختارهای زیر سطحی، این مقاطع را به مقاطع عمقی تبدیل نموده و در نهایت از روی این مقاطع، ضخامت لایه‌های مختلف زیر سطحی و برخی خصوصیات دیگر این لایه‌ها تعیین شدند.

در منطقه مورد مطالعه به دلیل رسانندگی بیش از اندازه زمین که ناشی از رطوبت بالا، شوری، میزان رس بالا و حضور رسوبات سیلتی، عمق نفوذ بسیار پایین بوده به طوری که در اکثر پروفیل‌ها عمق نفوذ کمتر از ۱ متر بوده است. ولی نکته قابل توجه در این پروفیل‌ها این است که علی‌رغم عمق نفوذ پایین، این روش ساختارهای ظریف را با قدرت تفکیک بسیار بالا به نمایش درآورده و توانسته لایه‌های با ضخامت اندک را از هم تفکیک کند. البته توجه به این نکته بسیار ضروری است که این لایه‌ها صرفاً لایه‌های ژئوفیزیکی هستند و ممکن است با لایه‌های زمین‌شناسی انطباق خوبی نداشته باشند. البته این احتمال قوی‌تر می‌باشد زیرا تغییر نوع رسوبات در فاصله‌ای در حدود چند ده سانتی‌متر از نظر زمین‌شناسی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد اما در هر حال، تغییر در یک ویژگی از قبیل نوع مایع در سازند، تغییرات تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت‌گیری و نحوه چینش، میزان رطوبت و... باعث تغییر در ثابت دی‌الکتریک و بازتاب از این مرزها شده و حتی اگر این لایه‌ها از جنس‌های متفاوتی نباشند، حداقل در یک ویژگی خاص متمایزند.

**کلمات کلیدی:** رادار نفوذی به زمین، امواج الکترومغناطیسی، گذردهی الکتریکی، رسانندگی الکتریکی، مقاطع زمانی و عمقی، پردازش داده‌ها، سرعت امواج رادار

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد

۱- بررسی ساختارهای زیر سطحی کم عمق در مناطق قره‌سو و جزیره آشوراده با روش رادار نفوذی به زمین (GPR). چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۸۹، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۲- بررسی دانه بندی رسوبات در ساختارهای لایه‌ای واقع در محدوده عمق نفوذ امواج رادار نفوذی به زمین (GPR). چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۸۹، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه و کلیات

۱ - ۱	مقدمه	۲
۲ - ۱	مختصری در مورد روش GPR	۲
۳ - ۱	مروری بر مطالعات انجام شده توسط GPR	۴
۴ - ۱	ضرورت و اهداف تحقیق حاضر	۵
۵ - ۱	ساختار پایان نامه	۶

### فصل دوم: روش رادار نفوذی به زمین GPR

۱ - ۲	دستگاه GPR	۸
۲ - ۲	اصول روش GPR	۸
۱ - ۲ - ۲	فرکانس تکرار	۱۰
۲ - ۲ - ۲	فاصله نمونه گیری	۱۱
۳ - ۲ - ۲	پنجره زمانی	۱۱
۴ - ۲ - ۲	فاصله ایستگاهی	۱۲
۵ - ۲ - ۲	هم انبارش	۱۲
۶ - ۲ - ۲	انتشار امواج GPR در زمین (از نظر میکروسکوپی)	۱۳
۷ - ۲ - ۲	انتشار امواج GPR در زمین (از نظر ماکروسکوپی)	۱۷
۳ - ۲	عوامل کاهش قدرت سیگنال	۱۸
۴ - ۲	عمق نفوذ	۲۰
۵ - ۲	بازتاب عبور	۲۱
۶ - ۲	منطقه گذار	۲۳
۷ - ۲	قدرت تفکیک	۲۴
۸ - ۲	عوامل مؤثر بر ثابت دی الکتریک	۲۶
۹ - ۲	روش های برداشت داده های GPR	۲۷
۱۰ - ۲	بدست آوردن سرعت در ساختارهای زیر سطحی	۳۰
۱۱ - ۲	از حوزه زمان به حوزه عمق	۳۱
۱۲ - ۲	پردازش داده های GPR	۳۲
۱ - ۱۲ - ۲	تصحیح جابجایی صفر زمانی	۳۲
۲ - ۱۲ - ۲	تصحیح سیگنال اشباع	۳۳
۳ - ۱۲ - ۲	بهره ها	۳۴



### فصل سوم: عملیات برداشت صحرائی

۳۸	۱-۳ مقدمه
۳۹	۲-۳ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی ناحیه مورد مطالعه
۳۹	۱-۲-۳ زمین شناسی ناحیه بهشهر
۳۹	۱-۲-۳ الف نهشته‌های تالابی
۴۰	۱-۲-۳ ب- نهشته‌های تلماسه‌ای
۴۰	۱-۲-۳ ج- نهشته‌های کرانه‌ای
۴۲	۲-۲-۳ زمین شناسی ناحیه گرگان
۴۲	۲-۲-۳ الف کفه رسی
۴۴	۳-۳ برداشت داده‌ها
۴۴	۳-۴ ویژگی‌های دستگاه GPR مورد استفاده در برداشت پروفیل‌ها
۴۵	۳-۵ پروفیل‌های برداشت شده
۴۶	۳-۶ نحوه برداشت پروفیل‌ها

### فصل چهارم: پردازش و تفسیر داده‌های GPR

۴۸	۱-۴ مقدمه‌ای در مورد تفسیر چینه شناختی
۴۹	۲-۴ پردازش داده‌های GPR
۵۱	۳-۴ مقاطع عمقی و طیف فرکانسی پروفیل‌ها به همراه تفسیر آن‌ها

### فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری

۸۶	۱-۵ نتایج
۸۷	۲-۵ پیشنهادات
۸۹	فهرست منابع
۹۲	پیوست (الف): معرفی مختصر نرم افزار Win_EKKO Pro
۹۵	پیوست (ب): طیف فرکانسی پروفیل‌های برداشت شده

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: اجزای دستگاه GPR ..... ۸
- شکل ۲-۲: مسیر امواج ارسال شده در روش GPR ..... ۹
- شکل ۳-۲: (الف) جهتگیری تصادفی دو قطبی‌های الکتریکی ناشی از حرکت گرمایی. (ب) قطبش در میدان الکتریکی ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: رد پای رادار ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: بیشترین عمق قابل بررسی در مواد زمین‌شناسی مختلف بصورت تابعی از فرکانس استفاده شده ..... ۲۱
- شکل ۶-۲: ضخامت منطقه گذار برای رسوبات با دانه بندی متفاوت (الف) به همراه مدل الکتریکی آن (ب) ..... ۲۴
- شکل ۷-۲: نحوه برداشت داده‌های GPR به روش پیمایش بازتابی با فاصله ثابت ..... ۲۸
- شکل ۸-۲: نحوه برداشت داده‌های GPR با روش CMP ..... ۲۹
- شکل ۹-۲: نحوه برداشت داده‌های GPR با استفاده از روش MOG و ZOG ..... ۳۰
- شکل ۱۰-۲: مسیر حرکت سیگنال در روش GPR ..... ۳۲
- شکل ۱۱-۲: مقایسه‌ی میزان نمایش جزئیات پروفیل هنگام استفاده از بهره‌ی ثابت و بهره‌ی SEC ..... ۳۶
- شکل ۱-۳: بخشی از نقشه زمین‌شناسی بهشهر به همراه راهنما ..... ۴۱
- شکل ۲-۳: بخشی از نقشه زمین‌شناسی گرگان به همراه راهنما ..... ۴۳
- شکل ۳-۳: عکس هوایی ناحیه مورد مطالعه ..... ۴۴

شکل ۴-۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	۵۰
Envelope (د).....	
شکل ۴-۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۰	۵۱
شکل ۴-۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain	۵۲
شکل ۴-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۲
شکل ۴-۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain	۵۳
شکل ۴-۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۴
شکل ۴-۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain	۵۵
شکل ۴-۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۵
شکل ۴-۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۵ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain	۵۶
شکل ۴-۱۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۵ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۶
شکل ۴-۱۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۶ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain	۵۷
شکل ۴-۱۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۶ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۸
شکل ۴-۱۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۷ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain	۵۹
شکل ۴-۱۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۷ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش	Envelope ۵۹

- شکل ۴- ۱۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۸ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۶۰
- شکل ۴- ۱۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۸ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۶۰
- شکل ۴- ۱۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۹ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۶۱
- شکل ۴- ۱۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۹ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۶۲
- شکل ۴- ۱۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۶۳
- شکل ۴- ۲۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۶۳
- شکل ۴- ۲۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۲ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۶۴
- شکل ۴- ۲۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۲ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۶۵
- شکل ۴- ۲۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۶۶
- شکل ۴- ۲۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۶۶
- شکل ۴- ۲۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۴ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC ..... ۶۷
- شکل ۴- ۲۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope ..... ۶۷
- شکل ۴- ۲۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۵ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC ..... ۶۸
- شکل ۴- ۲۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۵ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC و پردازش Envelope ..... ۶۸

- شکل ۴-۲۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۷ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۷ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC و پردازش Envelope ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۸ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۸ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۱
- شکل ۴-۳۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۹ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۹ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۳
- شکل ۴-۳۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۱ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۱ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۵
- شکل ۴-۳۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۲ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۵
- شکل ۴-۴۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۲ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۶
- شکل ۴-۴۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۶
- شکل ۴-۴۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۷

- شکل ۴-۴۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۴ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۷
- شکل ۴-۴۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۴ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۸
- شکل ۴-۴۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۵ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۷۸
- شکل ۴-۴۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۵ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۷۹
- شکل ۴-۴۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۹ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC ..... ۸۰
- شکل ۴-۴۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۹ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC و پردازش Envelope ..... ۸۰
- شکل ۴-۴۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۸۱
- شکل ۴-۵۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۸۱
- شکل ۴-۵۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC ..... ۸۲
- شکل ۴-۵۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۳ با اعمال فیلتر Dewow بهره AGC و پردازش Envelope ..... ۸۲
- شکل ۴-۵۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۴ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain ..... ۸۳
- شکل ۴-۵۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۴ با اعمال فیلتر Dewow بهره Autogain و پردازش Envelope ..... ۸۳
- شکل الف-۱: صفحه اصلی نرم افزار Win\_EKKO Pro ..... ۹۲
- شکل الف-۲: نمایش داده‌های GPR با استفاده از سربرگ View ..... ۹۴
- شکل ب-۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱ ..... ۹۵

- شکل ب-۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳ ..... ۹۵
- شکل ب-۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۴ ..... ۹۶
- شکل ب-۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۵ ..... ۹۶
- شکل ب-۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۶ ..... ۹۷
- شکل ب-۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۷ ..... ۹۷
- شکل ب-۷: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۸ ..... ۹۸
- شکل ب-۸: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۹ ..... ۹۸
- شکل ب-۹: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۰ ..... ۹۹
- شکل ب-۱۰: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۲ ..... ۹۹
- شکل ب-۱۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۳ ..... ۱۰۰
- شکل ب-۱۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۴ ..... ۱۰۰
- شکل ب-۱۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۵ ..... ۱۰۱
- شکل ب-۱۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۷ ..... ۱۰۱
- شکل ب-۱۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۸ ..... ۱۰۲
- شکل ب-۱۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۹ ..... ۱۰۲
- شکل ب-۱۷: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۰ ..... ۱۰۳
- شکل ب-۱۸: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۱ ..... ۱۰۳
- شکل ب-۱۹: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۲ ..... ۱۰۴

شکل ب-۲۰: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۳.....	۱۰۴
شکل ب-۲۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۴.....	۱۰۵
شکل ب-۲۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۵.....	۱۰۵
شکل ب-۲۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۹.....	۱۰۶
شکل ب-۲۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۰.....	۱۰۶
شکل ب-۲۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۳.....	۱۰۷
شکل ب-۲۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۴.....	۱۰۷

## فهرست جداول

جدول (۱ - ۲): مقادیر نوعی ثابت دی الکتریک ( $K$ ) ، سرعت ، اتلاف انرژی و رسانندگی برای مواد مختلف زمین در محدوده فرکانس .....	۱۷
جدول (۲ - ۲): گذر دهی نسبی محیط‌های مختلف، به همراه ضرایب بازتاب محاسبه شده برای فصل مشترک آنها.....	۲۳
جدول (۲ - ۳): مقادیر ایده‌آل قدرت تفکیک و ردپای رادار که برای فرکانس‌های خاصی با استفاده از روابط بدست آمده‌اند .....	۲۵





# فصل اول

## مقدمه و کلیات

## ۱-۱- مقدمه

روش رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> یکی از روش‌های با قدرت تفکیک<sup>۲</sup> بالای ژئوفیزیک می‌باشد. در این روش از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) برای آشکارسازی توده‌های زیر سطحی استفاده می‌شود [www.malags.com & www.sensoft.ca]. به همین دلیل در تقسیم بندی‌های ژئوفیزیک، معمولاً آن را در حوزه روش‌های الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌کنند، در حالی که در این روش انتشار امواج الکترومغناطیسی در داخل زمین و همچنین روش پردازش و تفسیر داده‌ها به لرزه‌نگاری بازتابی (انعکاسی) شباهت زیادی دارد. دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده و کاربرد آن از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت افزایش یافته است، که از عوامل این استقبال می‌توان به سهولت دسترسی، سهولت در برداشت داده‌ها، شباهت آن با لرزه‌نگاری بازتابی و قدرت تفکیک بالای این روش اشاره کرد [Neal, 2004].

کاربردهای GPR بسیار گسترده بوده و مقالات و مطالعات مختلفی در حوزه علوم زمین، مطالعات زیست‌محیطی، آب‌شناسی، یخچال‌شناسی، باستان‌شناسی، فعالیت‌های عمرانی و غیره به چاپ رسیده است [Knight, 2001 ; Reynolds, 1997].

## ۱-۲- مختصری در مورد روش GPR

موفقیت همه روش‌های ژئوفیزیکی وابسته به وجود تباین در ویژگی‌های فیزیکی توده‌های زیر سطحی می‌باشد. کمیتی که باعث می‌شود توده‌های زیر سطحی توسط روش GPR قابل آشکارسازی باشند، ثابت دی‌الکتریک می‌باشد و در واقع تباین در میزان ثابت دی‌الکتریک توده و محیط در برگیرنده آن باعث آشکارسازی توده می‌شود. ثابت دی‌الکتریک به‌عنوان توانایی یک

---

<sup>۱</sup>Ground penetrating radar (GPR)

<sup>۲</sup>Resolution

ماده در ذخیره و اجازه عبور دادن به انرژی الکترومغناطیسی وقتی که یک میدان بر ماده اعمال می‌شود، تعریف می‌شود [Baker et al, 2007].

یک دستگاه GPR به طور معمول شامل یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده است که آنتن فرستنده یک پالس<sup>۱</sup> الکترومغناطیسی را ارسال می‌کند که در زیر سطح منتشر شده و سپس از یک سطح مشترک بازتاب، یا توسط منابع نقطه‌ای پراکنده می‌شود (هر دوی این‌ها ناشی از تباین در گذردهی نسبی هستند). قسمتی از این انرژی بازتاب شده، سپس به سمت سطح زمین حرکت می‌کند و توسط آنتن گیرنده ثبت می‌شود. مدت زمانی که طول می‌کشد تا موج به داخل زمین رفته و از فصل مشترکی بازتاب یافته و به سمت سطح زمین بازگردد، را زمان سیر<sup>۲</sup> می‌نامند. دستگاه‌های GPR زمان رسیدن رویدادها را اندازه‌گیری می‌کنند و به این ترتیب بازتاب از توده‌های سطحی به صورت تابعی از زمان نشان داده می‌شوند. برای اینکه رویدادهای بازتابی به عمق صحیح‌شان نسبت داده شوند باید توزیع صحیح سرعت امواج GPR در ساختارهای زیر سطحی مشخص شوند. سرعت موج الکترومغناطیسی در اتمسفر زمین یا نزدیک سطح دریا ۰/۳ متر بر نانو ثانیه است. به دلیل این که گذردهی نسبی همه مواد زمین بزرگتر از گذردهی هوا می‌باشد، سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در همه مواد زمین کمتر از سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در هوا خواهد بود و به طور نوعی در محدوده بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ متر بر نانو ثانیه قرار می‌گیرد. [Daniels et al, 1995].

---

<sup>۱</sup>Pulse

<sup>۲</sup>Two-way travel time

### ۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده

مطالعات و تحقیقات بر روی روش GPR در حدود سه دهه است که در نقاط مختلف دنیا در حال انجام است. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می توان به مطالعات آنان<sup>۱</sup> و دیویس<sup>۲</sup> در زمینه لایه های خاک منجمد<sup>۳</sup> و مطالعات دیگرشان در زمینه چینه شناسی اشاره کرد [Davis and Annan., 1989]. همچنین از اولین مقاله ها در زمینه پردازش داده های GPR می توان به مقاله فیشر<sup>۴</sup>، مک مکان<sup>۵</sup> و همکارانش (۱۹۹۲) در زمینه مهاجرت داده های GPR / اشاره کرد [Fisher et al, 1992]. مطالعات آزمایشگاهی کافمن و همکاران با استفاده از مشخصه های امواج GPR در حفرات زیر سطحی در سال ۲۰۰۶ از مطالعات اخیر در آشکار سازی حفرات زیر سطحی است. [Kofman et al, 2006]. از معدود مطالعات انجام شده در کشور ما آشکار سازی شکستگی ها و تاقدیس های نزدیک سطح در منطقه سراب قنبر در جنوب کرمانشاه در سال ۱۳۸۶ [اویسی موخر، ۱۳۸۶] و مطالعات GPR در کنار روش مغناطیس سنجی برای آشکار سازی طاق های باستانی مدفون در خاک های نزدیک سطح در سال ۱۳۸۴ در قصر شیرین اشاره کرد [اویسی موخر و همکاران، ۱۳۸۴]. از دیگر مطالعات انجام شده در کشور می-توان به مطالعات بر روی لوله های مدفون در منطقه شاهرود در سال ۱۳۸۷ اشاره کرد که در این مطالعه سعی بر این بوده که روش مقاومت ویژه و روش GPR با هم مقایسه شده و برتری روش GPR بر روش مقاومت ویژه در مواردی که عمق نفوذ بالایی مدنظر نیست، نشان داده شود [محمدی ویژه، ۱۳۸۷]. مطالعه دیگری که در منطقه شاهرود انجام شده است، مطالعه بر روی کیفیت آسفالت می باشد که در سال ۱۳۸۹ و برای بررسی کیفیت آسفالت و تعیین تقریبی

---

<sup>۱</sup>Annan

<sup>۲</sup>Davis

<sup>۳</sup>Permafrost

<sup>۴</sup>Fisher

<sup>۵</sup>McMechan

میزان تخلخل و دیگر پارامترهای مؤثر بر کیفیت آسفالت انجام شده است [مزینانی، ۱۳۸۹]. از مطالعات دیگر در این زمینه منابع مذکور در آخر این پایان نامه می باشد که ذکر تمامی آن ها در این قسمت از پایان نامه ضروری به نظر نمی رسد.

#### ۴-۱- ضرورت و اهداف تحقیق حاضر

به دلیل ویژگی های منحصر به فرد روش GPR از قبیل قدرت تفکیک بالا، سرعت برداشت زیاد، خاصیت غیر تهاجمی<sup>۱</sup>، تأثیر پذیری اندک از نوفه<sup>۲</sup> های محیطی، استفاده از آن در حال گسترش می باشد و با توجه به اینکه مطالعات ژئوفیزیکی با استفاده از این روش به ویژه در مناطق ساحلی و در شناسایی بی هنجاری های زیر سطحی در کشورمان شناخته شده نیست، نیاز به تحقیق در این زمینه احساس می شود. یکی از اهداف تحقیق حاضر، کاربرد روش GPR و پردازش و تفسیر داده های آن به عنوان یکی از روش های با قدرت تفکیک بالا در برداشت های زیر سطحی کم عمق است. از دیگر اهداف این مطالعه نشان دادن برتری این روش ( در مواردی که عمق نفوذ بالایی مد نظر نیست ) بر روش های دیگر که به دلایلی از قبیل زمان بر بودن عملیات برداشت و یا نوفه محیطی، ما را با مشکل مواجه می کنند، می باشد، ضمن اینکه همان طور که در بالا گفته شد و در عمل نیز دیده می شود، قدرت تفکیک این روش نسبت به سایر روش های ژئوفیزیکی بیشتر است. در این تحقیق ما پروفیل هایی در نقاط مختلف مناطق ساحلی جنوب شرق دریاچه خزر برداشت و سپس با استفاده از داده های برداشت شده، سعی در نشان دادن توالی لایه های نازک رسوبی و رخساره های رسوبی بود و همچنین سعی بر این بود که نتایج

---

<sup>۱</sup> Non-invasive

<sup>۲</sup> Noise

حاصل از کارهای نرم افزاری با نتایج حاصل از حفاری و مغزه‌گیری مقایسه شود که البته به دلیل عدم دسترسی به نتایج حفاری بررسی تطابق این دو مطالعه میسر نیست.

## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در ۵ فصل نگارش شده است. در فصل اول مقدمه‌ای در خصوص پایان‌نامه، ضرورت و همچنین هدف از انجام این مطالعه آمده است. در فصل دوم، به معرفی روش GPR، تئوری انتشار امواج آن و همچنین ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد پرداخته شده است. در فصل سوم، عملیات برداشت داده‌ها در نواحی برداشت شده مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم پردازش و تفسیر داده‌های برداشتی مورد بحث واقع شده و با اعمال بهره‌ها و فیلترهای لازم، مقاطع عمقی به دست آمده‌اند و بحث در این فصل با استفاده از این مقاطع و توضیح آن‌ها ادامه یافته است. در نهایت، در فصل پنجم که فصل آخر این پایان‌نامه است، نتایج مطالعه حاضر و پیشنهادات لازم ارائه شده است.

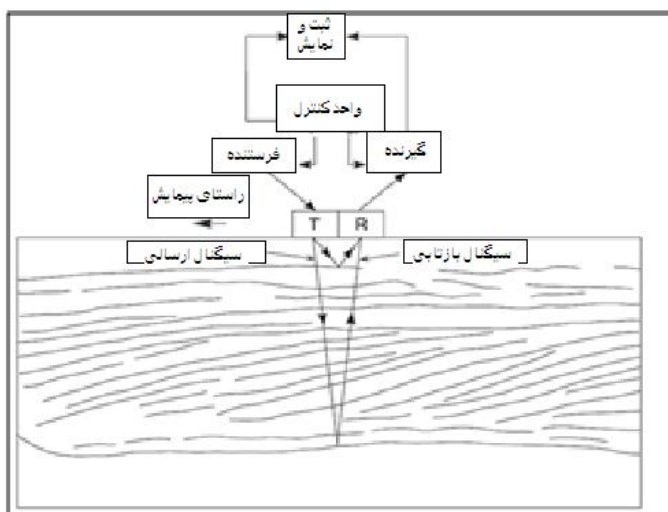
## فصل دوم

### روش رادار نفوذی به زمین (GPR)



## ۱-۲- دستگاه GPR

اجزاء دستگاه GPR در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. سیستم GPR از یک مولد سیگنال، یک فرستنده (T) و یک گیرنده (R) تشکیل شده است. بعضی سیستم‌های پیشرفته GPR دارای یک کامپیوتر همراه می‌باشند که پردازش داده‌ها در زمان برداشت و پس از آن را ممکن می‌سازد. دستگاه‌های GPR در دو نوع تک آنتن<sup>۱</sup> و دو آنتن<sup>۲</sup> به کار می‌روند. در مورد اول از یک آنتن و در مورد دوم از دو آنتن مجزا برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌شود [Neal., 2004]



شکل ۱-۲: اجزای دستگاه GPR [Neal., 2004]

## ۲-۲- اصول روش GPR

برداشت‌های GPR هم از طریق پروفیل زنی پیوسته<sup>۳</sup> و هم از طریق برداشت در نقاط ثابت انجام می‌پذیرد. در پروفیل زنی پیوسته، آنتن‌ها روی زمین و در روی پروفیل مورد نظر با سرعت ثابت

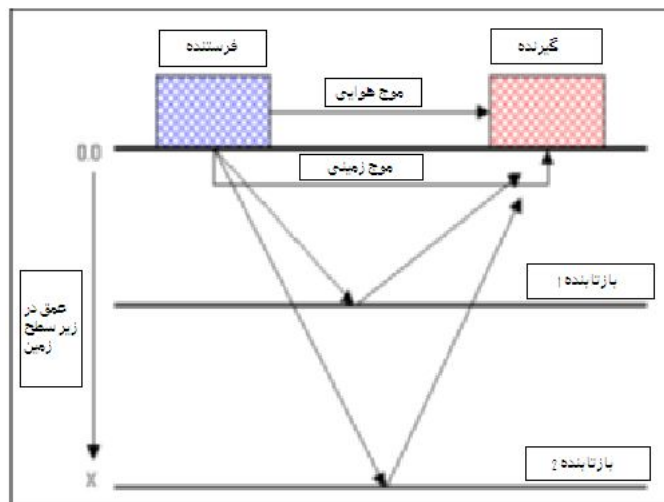
<sup>۱</sup>Monostatic

<sup>۲</sup>Bistatic

<sup>۳</sup>Continuous profiling

کشیده می‌شوند. در مواقعی که سرعت بیشتری برای اکتساب داده‌ها مورد نیاز است، آنتن‌ها در عقب یک وسیله نقلیه حمل می‌شوند.

GPR بر اساس بازتاب و آشکارسازی لایه‌ها و توده‌های زیر سطح زمین برای ایجاد یک تصویر زیر سطحی استفاده می‌شود. اولین سیگنال دریافتی، سیگنال مستقیم منتشر شده در هوا است که از فرستنده به سمت گیرنده می‌رود و به دنبال آن یک موج زمینی و بعد از آن، سایر بازتاب‌ها از سطوح و توده‌های موجود در زیر سطح زمین به گیرنده می‌رسند. زمانی که پالس الکترومغناطیسی ساطع شده از آنتن به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می‌شود. این امر به دلیل تغییر امپدانس امواج الکترومغناطیسی در فصل مشترک دو محیط می‌باشد [Apparao, 1997].



شکل ۲-۲: مسیر امواج ارسال شده در روش GPR [Howe., 2000]

مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلافی بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو سمت فصل مشترک دارد، که در ادامه درباره آن بیشتر بحث خواهد شد. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی که از آنتن فرستنده ساطع و بعد از بازتاب از توده‌های زیر سطحی به آنتن گیرنده اندازه‌گیری شود، می‌توان عمق توده مورد نظر را تعیین نمود. البته این امر در صورتی امکان پذیر است که سرعت پالس (موج الکترومغناطیسی) در محیط مورد بررسی

مشخص باشد. دامنه سیگنال بازتابی نشان‌دهنده ویژگی‌های هدف بوده و سرعت انتشار موج به ویژگی‌های محیطی که موج از آن عبور می‌کند، بستگی دارد. زمان رفت و برگشت موج از چند ده تا چندین هزار نانوثانیه متغیر می‌باشد و برای ثبت چنین زمان‌هایی به دستگاه‌هایی با دقت بسیار بالا احتیاج نیاز است [Reynolds, 1997].

اکثر سیستم‌های GPR از دو آنتن برای فرستادن و دریافت امواج استفاده می‌کنند. ساده‌ترین آنتن‌ها دو قطبی‌های الکتریکی هستند که از یک میله فلزی به قطر چند میلیمتر تا ۲ سانتیمتر، ساخته شده‌اند. معمولاً جنس این میله‌ها از آلومینیم است و روکشی از جنس نیکل دارند. طول آنتن بستگی به مشخصات پالس فرستنده دارد که مهمترین این مشخصات دوره یا پهنای پالس<sup>۱</sup> است. آنتن‌هایی با طول ۰/۹ تا ۱/۲ متر برای ارسال پالس‌هایی با پهنایی بین ۸ تا ۱۲ نانو ثانیه و آنتن‌هایی با طول ۰/۱۵ تا ۰/۴ متر برای تولید پالس‌هایی با پهنای تقریبی ۱ تا ۲ نانوثانیه کاربرد دارند. در پهنای پالس ۱ تا ۱۰۰۰ نانوثانیه، طول آنتن مستقیماً با پهنای پالس متناسب است. یعنی هر چه پالس دارای پهنای بیشتری باشد، بایستی طول آنتن بکار رفته نیز بیشتر باشد [Reynolds, 1997].

## ۲-۲-۱- فرکانس تکرار<sup>۲</sup>

باید به این نکته توجه داشت که آنتن‌های GPR تنها یک پالس منفرد ارسال نمی‌کنند، بلکه یک رشته پالس را در فواصل زمانی معین ساطع می‌کنند. عموماً این فاصله زمانی بین ۲ تا ۵۰ میکرو ثانیه می‌باشد و به عکس زمان بین دو پالس متوالی، فرکانس تکرار می‌گویند. این پالس‌ها از تعدادی موج سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌ها و فازهای مختلف تشکیل شده‌اند و مربع

---

<sup>۱</sup>Pulse width

<sup>۲</sup>Repetition frequency

دامنه در هر فرکانس متناسب با انرژی ساطع شده در آن فرکانس می‌باشد. فرکانسی که بیشترین تمرکز انرژی در آن واقع است، فرکانس مرکزی نام دارد [Apparao, 1997].

### ۲-۲-۲- فاصله نمونه گیری<sup>۱</sup>

در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی، گیرنده، پالس‌های ورودی را به صورت قیاسی (آنالوگ) اندازه‌گیری می‌کند. این سیگنال‌ها در گیرنده تقویت می‌شوند و سپس به صورت دیجیتال در حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شوند، تا پردازش‌های بعدی روی آن‌ها صورت گیرد. برای این کار سیگنال‌های دریافتی در گیرنده نمونه‌گیری می‌شوند، به فاصله زمانی که سیگنال‌ها در آن نمونه‌گیری می‌شوند فاصله نمونه‌گیری گفته می‌شود. هر بازتاب پالسی را نشان می‌دهد که در شرایط ایده‌آل شکل و دوره آن با پالس فرستاده شده یکسان است، ولی دامنه متفاوت دارد و مانند پالس فرستاده شده متشکل از چندین فرکانس می‌باشد. اگر  $\nu_s$  فرکانس نمونه‌گیری و  $\nu_{max}$  بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال باشد،  $\nu_s$  باید بزرگتر از  $2\nu_{max}$  باشد. در چنین شرایطی نمونه‌گیری به درستی انجام شده و در شکل سیگنال ثبت شده بدنمایی<sup>۲</sup> رخ نمی‌دهد [Howe, 2000].

### ۲-۲-۳- پنجره زمانی<sup>۳</sup>

به مدت زمانی که رویدادها بین دو پالس متوالی ارسالی ثبت می‌شوند پنجره زمانی گفته می‌شود [Parasnis., 1997]. طول پنجره زمانی برابر مدت زمان لازم برای رفت و برگشت سیگنال تا عمق ماکزیمم بوده و در تمامی دستگاه‌ها قابل تنظیم می‌باشد [Apparao, 1997]. در واقع

---

<sup>۱</sup> Sampling interval

<sup>۲</sup> Aliasing

<sup>۳</sup> Time window

پنجره زمانی بیان کننده طول مدت زمانی است که سیستم رادار سیگنال بازگشتی را در آن ثبت می کند. سیگنال هایی که زمان بیشتری را برای بازگشت به گیرنده در راه هستند، عموماً فاصله بیشتری را در زیر سطح طی می کنند. انتخاب یک پنجره زمانی مناسب از آنجایی که این عامل در عمق بررسی محدودیت ایجاد می کند، در طراحی کاوش های GPR مسئله مهمی است [Howe, 2000].

### ۲-۲-۴- فاصله ایستگاهی<sup>۱</sup>

این اصطلاح به فاصله افقی بین دو رد<sup>۲</sup> مجاور هم در یک خط برداشت اشاره دارد و یک عامل کلیدی در توصیف ترکیبات زیر سطحی است. هنگامی که فاصله بین نقاط نمونه گیری (نقاط برداشت) افزایش پیدا می کند، احتمال نمونه گیری نامناسب از تغییرات فضایی بازتابنده های با شیب تند افزایش یافته و در نتیجه بدنمایی در تصاویر ایجاد می شود [Howe., 2000].

### ۲-۲-۵- بر هم انباشش<sup>۳</sup>

بر هم انباشش اصطلاحی است که برای تعریف تعداد زمان هایی که در یک نقطه اندازه گیری، میانگین گیری می شوند تا یک رد GPR تولید شود، استفاده می شود. از آنجایی که فرآیند میانگین گیری رد، خروجی نهایی را هموار می کند، در محیط هایی که نوفه<sup>۴</sup> الکتریکی دارند مقدار بالای بر هم انباشش، اثرات ناشی از زمینه را کاهش می دهد. افزایش بر هم انباشش، مدت زمان

---

<sup>۱</sup> Station spacing

<sup>۲</sup> Trace

<sup>۳</sup> Stacking

<sup>۴</sup> Noise

لازم برای اندازه‌گیری در هر نقطه را افزایش داده و در نتیجه فرآیند جمع‌آوری داده‌ها را کند می‌کند [Howe., 2000].

## ۲-۲-۶- انتشار امواج GPR در زمین (از نظر میکروسکوپی)

GPR بر پایه اندازه‌گیری امواج الکترومغناطیسی بازتابی از مرزهای مواد در زیر سطح زمین استوار است. انتشار امواج الکترومغناطیسی در سراسر یک محیط به خواص مواد موجود در آن محیط، در آن فرکانس خاص، بستگی دارد. انتشار موج به عواملی چون رسانندگی الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک و تراوایی (نفوذ پذیری) مغناطیسی مواد بستگی دارد. در معرض یک میدان الکتریکی وقتی یک پالس الکترومغناطیسی به‌عنوان یک تابع سینوسی به داخل محیط تابیده می‌شود، ابر الکترونی اطراف هر اتم داخلی، در راستای میدان جهت‌گیری می‌کند و اتم‌ها به شکل دوقطبی درمی‌آیند. به این پدیده قطبش<sup>۱</sup> می‌گویند. مواد غیر رسانایی که در اثر اعمال یک میدان الکتریکی بر آن‌ها قطبیده می‌شوند، دی‌الکتریک نامیده می‌شوند [Alonso and Finn., 1992].

قطبش یک بردار کوانتیده است که متناسب با شدت میدان الکتریکی اعمال شده می‌باشد یعنی:

$$P = \epsilon_0 \chi_e \delta \quad (1-2)$$

که در آن  $\chi_e$  میزان پاسخ اتمی به میدان الکتریکی است که ضریب مغناطیس پذیری یا پذیرفتاری (خودپذیری) مغناطیسی ماده مورد نظر نامیده می‌شود و بستگی به خواص مولکول-های آن ماده دارد.  $\delta$  میزان اتلاف<sup>۲</sup> و  $\epsilon_0$  نیز ثابت گذردهی خلأ می‌باشد. از آنجایی که در اکثر

---

<sup>۱</sup> Polarization

<sup>۲</sup> Loss

موارد برای صحبت از خواص مواد از مقادیر نسبی آنها استفاده می‌شود، ثابت گذردهی نسبی

$\epsilon_r$  نیز که کمیتی بدون بعد است به صورت زیر تعریف می‌شود [Howe, 2000]:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi_e \quad (2-2)$$

ثابت گذردهی نسبی را ثابت دی‌الکتریک نیز می‌نامند و با K نمایش می‌دهند. ثابت دی‌الکتریک برای برخی از مواد، در محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز در جدول ۲-۱ آمده است.

هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی در یک محیط منتشر می‌شود میدان الکتریکی باعث ایجاد حرکت در بارهای الکتریکی می‌شود. دو نوع حرکت به وجود می‌آید که عبارتند از جریان القایی<sup>۱</sup> و جریان جابجایی<sup>۲</sup>. جریان القایی وقتی ایجاد می‌شود که میدان الکتریکی باعث جابجایی بارهای آزاد (مثل الکترون‌ها) در داخل مواد شود. هنگام این جابجایی، بارها با مولکول‌های ساکن برخورد کرده و انرژی را به صورت گرما در محیط پخش می‌کنند [McNeill, 1980].

جریان‌های جابجایی (قطبش) هنگامی که بارها در فاصله محدودی به صورت اجباری جابجا می‌شوند رخ می‌دهند. چهار مکانیسم برای قطبش وجود دارد [Powers, 1997]. اولی قطبش الکترونیکی است و هنگامی اتفاق می‌افتد که ابر الکترونی حلقوی شکل، بیضی شکل شود. دومی قطبش مولکولی است و هنگامی که مولکول‌های باردار شکسته می‌شوند، اتفاق می‌افتد. سومی قطبش سمتی<sup>۳</sup> است و هنگامی که مولکول‌های دوقطبی در حضور میدان الکتریکی می‌چرخند، اتفاق می‌افتد و چهارمی قطبش مرزی (دووجهی<sup>۴</sup>) است که یون‌های انباشته شده در سطح مشترک مواد را گیر می‌اندازد [Annan, 1997].

---

<sup>۱</sup> Conduction current

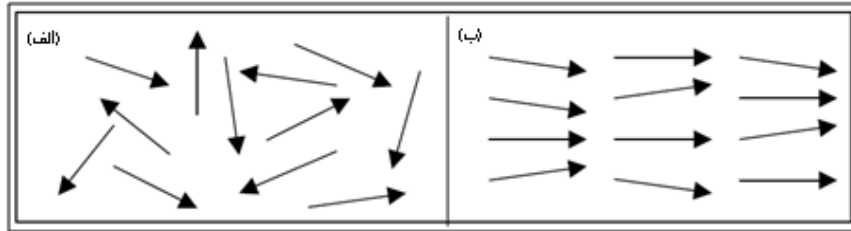
<sup>۲</sup> Displacement current

<sup>۳</sup> Orientational polarization

<sup>۴</sup> Interfacial polarization

در مواد با رسانندگی الکتریکی ثابت ( $\sigma$ )، مکانیسم عمده جریان توسط فرکانس سیگنال تعیین

می‌شود [Annan, 1997]



شکل ۲-۳: (الف) جهت گیری تصادفی دو قطبی‌های الکتریکی در اثر حرکت گرمایی (ب) قطبش در اثر اعمال میدان الکتریکی [Alonso and Finn., 1992]

فرکانسی را که در آن هر دو جریان (القایی و جابجایی) با هم مساوی هستند اصطلاحاً فرکانس-گذار<sup>۱</sup> می‌نامند و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi \times K \times 8.85 \times 10^{-12}} \quad (۳-۲)$$

که در آن  $K$  ثابت دی‌الکتریک و  $\sigma$  رسانندگی محیط است.

نسبت جریان‌های القایی  $J_c$  و جریان‌های جابجایی  $J_d$  در یک فرکانس  $f$  با تانژانت افت سیگنال داده می‌شود:

$$\tan \delta = \frac{|J_c|}{|J_d|} = \frac{\sigma}{(2\pi \times K \times 8.85 \times 10^{-12})} \quad (۴-۲)$$

ثابت دی‌الکتریک برخی مواد ترکیبی از دو عدد است:

$$K = K_R + jK_i \quad (۵-۲)$$

قسمت حقیقی ( $K_R$ )، انتشار موج در محیط را توصیف می‌کند و قسمت موهومی ( $K_i$ )

میزان اتلاف انرژی امواج رادار به دلیل فرآیند القا را توصیف می‌کند. برای رسانایی غیر صفر، که در اکثر موارد وضعیت به همین شکل است، هر دو مولفه به فرکانس بستگی دارند

<sup>۱</sup> Transition frequency



[Schmugge., 1980]. در فاصله فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتزی پنجره فرکانسی‌ای وجود دارد که در آن عملکرد رادار بهینه بوده و سرعت و اتلاف امواج الکترومغناطیسی نسبتاً مستقل از فرکانس می‌باشند [Annan, 1996]. در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ مگاهرتز مقدار  $K_i$  به سرعت افزایش پیدا می‌کند و واهلش چرخشی<sup>۱</sup> آب در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز ایجاد می‌شود. این اثر واهلش از آن جهت که تقریباً همه مواد زمین شامل مقداری آب هستند، بسیار مهم است. اتلاف ناشی از پراکندگی<sup>۲</sup> هنگامی که اندازه طول موج به اندازه ذرات می‌رسد افزایش می‌یابد. برای مواد کم اتلاف،  $\tan \delta \ll 1$  می‌باشد و افت<sup>۳</sup> امواج ( $\alpha$ ) بصورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\alpha = \frac{1.69 \times 10^3 \sigma}{(K_R)^{\frac{1}{2}}} \quad (۶-۲)$$

بطور مشابه هنگامی که  $\delta \ll 1$  باشد سرعت امواج الکترومغناطیسی توسط معادله زیر

تخمین زده می‌شود:

$$V = \frac{c}{(K_R)^{1/2}} \quad (۷-۲)$$

که در آن  $c$  سرعت انتشار موج تخت الکترومغناطیسی در فضای آزاد است ( $3 \times 10^8 m/s$ ). این

معادله به ما این امکان را می‌دهد که از سرعت موج به ثابت دی‌الکتریک برسیم.

---

<sup>۱</sup> Rotation relaxation

<sup>۲</sup> Scattering

<sup>۳</sup> Attenuation

جدول ۱-۲: مقادیر نوعی ثابت دی الکتریک (K)، سرعت، اتلاف انرژی و رسانندگی برای مواد مختلف زمین در محدوده فرکانس GPR [Davis & Annan, 1989].

ماده	K	سرعت (m/ns)	اتلاف $\alpha$ (dB/m)	رسانندگی $\sigma$ (mS/m)
هوا	۱	۰/۳۰	۰	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱
آب شیرین	۸۰	۰/۰۳۳	۰/۱	۰/۵
آب دریا	۸۰	۰/۰۱	۱۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
گرانیت	۴-۶	۰/۱۲	۰/۰۱-۱	۰/۰۱-۱
یخ	۳-۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۰۱
سنگ آهک	۴-۸	۰/۱۲	۰/۴-۱	۰/۵-۲
شیل	۵-۱۵	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۱-۱۰۰
نمک خشک	۵-۶	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۰/۰۱-۱
سیلت	۵-۳۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۱-۱۰۰
رس	۵-۴۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰	۲-۱۰۰۰
شن خشک	۳-۵	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱
شن اشباع	۲۰-۳۰	۰/۰۶	۰/۰۳-۰/۳	۰/۰۱-۱

## ۲-۲-۷- انتشار امواج GPR در زمین (از نظر ماکروسکوپی)

به علت انتشار کروی امواج الکترومغناطیسی، انرژی بازتاب شده که به آنتن می‌رسد حاصل برخورد امواج الکترومغناطیسی با یک نقطه خاص نمی‌باشد و سیگنال‌ها از سطوح تحت نفوذ رادار، بازمی‌گردند. اندازه این سطح یا ردپای رادار<sup>۱</sup> بستگی به عواملی چون طول موج ( $\lambda$ )، عمق بازتاب کننده ( $Z$ ) و ثابت دی‌الکتریک ( $K$ ) موادی که سیگنال از آن عبور می‌کند، دارد. با توجه به اینکه موج به صورت یک مخروط با مقطع بیضوی از منبع منتشر می‌شود، افزایش عمق بررسی، منجر به افزایش ردپای رادار می‌شود [Howe, 2000]. افزایش ثابت دی‌الکتریک، پهن‌شدگی را کاهش می‌دهد و مقطع مخروط تقریباً دایره‌ای می‌شود. خاک اشباع از آب ردپای رادار کوچکتری نسبت به نمونه مشابه خود در حالت خشک را در عمق برابر دارد. افزایش فرکانس نیز ابعاد ردپای رادار را کاهش می‌دهد و سبب افزایش قدرت تفکیک می‌شود. اگر گسترش جانبی بازتاب کننده‌ای بزرگتر از رد پای رادار باشد، شکل آن به خوبی روی مقطع زمانی دیده می‌شود اما اگر گسترش جانبی بازتاب کننده کمتر از این مقدار باشد، امواج از سطح آن پراشیده شده و

<sup>۱</sup>Footprint

به جای شکل بازتاب کننده، پدیده پراش در مقطع زمانی برجسته خواهد بود. در چنین حالتی تشخیص شکل بازتاب کننده در مقطع زمانی مشکل است. معادله زیر برای تعیین ابعاد ردپای رادار ارائه شده است [Annan, 2001]:

$$X = \frac{\lambda}{4} + \frac{z}{\sqrt{k-1}} \quad (۸-۲)$$

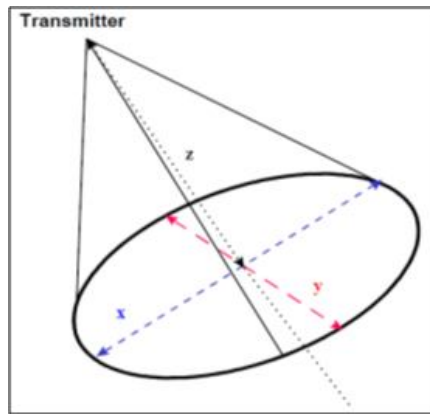
$$Y = \frac{x}{2} \quad (۹-۲)$$

که در آن X و Y به ترتیب قطر بزرگ و قطر کوچک بیضی و Z ارتفاع مخروط می باشد. K نیز ثابت دی الکتریک مواد تشکیل دهنده محیط است.

حجم خاک بررسی شده می تواند با استفاده از فرمول ریاضی استاندارد برای حجم

مخروط با مقطع بیضوی محاسبه شود:

$$V = \frac{1}{3} \pi XYZ \quad (۱۰-۲)$$



شکل ۲-۴: ردپای رادار [Howe., 2000]

## ۲-۳- عوامل کاهش قدرت سیگنال

هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی در یک محیط منتشر می شود عوامل مختلفی در کاهش قدرت سیگنال دخیل هستند. این عوامل عبارتند از پراکندگی امواج GPR در اثر برخورد با اشیاء یا ذراتی که ابعادی در حدود طول موج رادار دارند انعکاس و عبور از فصل مشترک، اتلاف

انرژی به صورت گرما و پخش هندسی امواج. با وجود موارد فوق مسبب اصلی کاهش انرژی سیگنال، اتلاف بوده که خود تابعی از مشخصات الکتریکی محیط انتشار موج می باشد. اتلاف با فرکانس رابطه مستقیم دارد و گذردهی نسبی و رسانندگی محیط نیز روی میزان اتلاف تأثیر دارند. البته لازم به ذکر است که در اغلب شرایط زمین شناسی، رسانندگی دارای بیشترین تأثیر بر اتلاف امواج GPR می باشد. در مناطقی که سازندها اشباع می باشند، افزایش میزان رسانندگی به دلیل حضور سیال و بالا بودن گذردهی نسبی مایع داخل سازند، اتلاف را به طور چشمگیری افزایش می دهد. وجود رس در سازند به دلیل وجود آب در ساختار شبکه ای آن نیز چنین اثری را به همراه دارد. لازم به ذکر است که آب شیرین جزء مواد کم اتلاف به حساب می آید و وجود یون های محلول در قسمت اشباع سازند باعث اتلاف امواج رادار می شود [Davis and Annan., 1989].

همان طور که گفته شد امواج GPR در اثر برخورد با اشیاء با ابعاد طول موج GPR موجود در محیط های زیر سطحی، در راستاهای مختلف پراکنده شده و باعث ایجاد نوفه های کلاتر<sup>۱</sup> بر روی مقاطع زمانی می گردند. از دیگر عوامل کاهش انرژی سیگنال می توان بازتاب و عبور از هر فصل مشترک را نام برد. انرژی سیگنال GPR همچنین با تبدیل به گرما، اتلاف و توسط پخش هندسی در محیط کاهش می یابد. انرژی امواج رادار با نسبت  $\frac{1}{r^2}$  در واحد سطح کاهش می یابد، که در این رابطه  $r$  فاصله پیمایش امواج در محیط می باشد. در نهایت کاهش و اتلاف انرژی را می توان متشکل از ۵ قسمت دانست:

- ۱- اتلاف انرژی توسط آنتن ها ۲- اتلاف انرژی مابین هوا و زمین ۳- کاهش انرژی توسط پخش هندسی امواج GPR ۴- اتلاف انرژی در زمین به صورت تابعی از مشخصات مواد تشکیل دهنده زمین ۵- کاهش انرژی به واسطه پخش امواج توسط اهداف موجود [Davis & Annan, 1989].

---

<sup>۱</sup> Clutter

گفته شد رسانندگی الکتریکی عامل اصلی اتلاف است ولی رسانندگی الکتریکی بیشتر مواد خیلی پایین است هر چند در این زمینه نیز استثناء وجود دارد. که از آن جمله مگنتیت، کربن و پیریت را می‌توان نام برد. در خاک‌ها، رسانندگی بستگی به تخلخل، محتوای رطوبت، میزان اشباع از الکترولیت‌ها، دمای آب، و میزان ترکیبات کلوئیدی دارد تا به نوع کانی [McNeill., 1980]

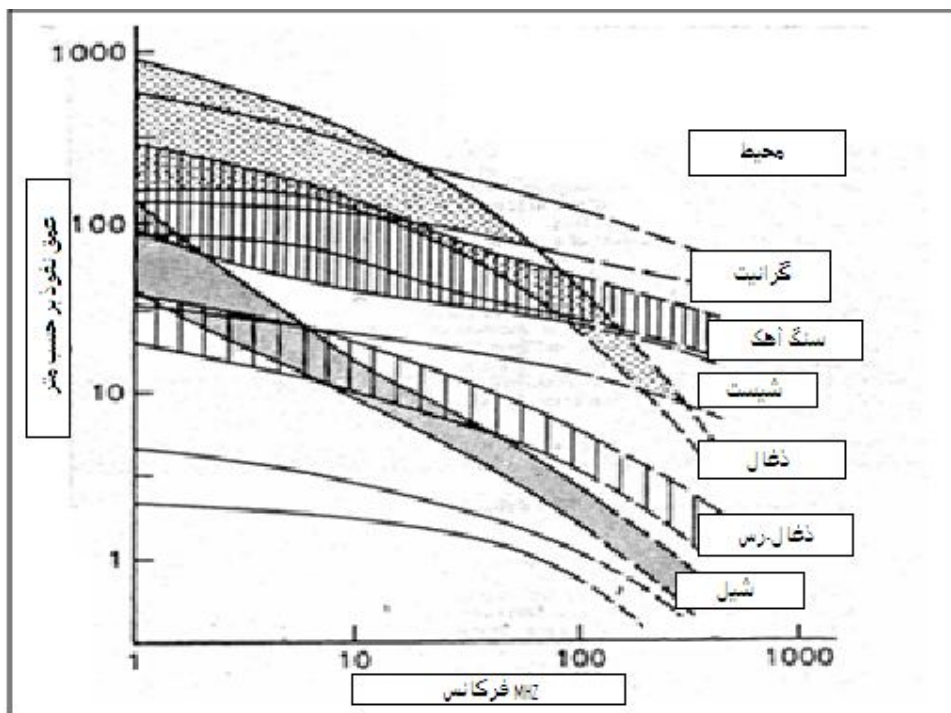
## ۲-۴- عمق نفوذ

عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی از عوامل مقاومت ویژه و گذردهی محیط انتشار و همچنین از فرکانس موج مورد استفاده تأثیر می‌پذیرد. یک طرح شماتیک برای بیشترین عمق قابل بررسی در مواد مختلف زمین‌شناسی در سال ۱۹۷۵ توسط کوک<sup>۱</sup> ارائه شد. همان‌طور که در این طرح که در شکل ۶-۲ آورده شده است، مشاهده می‌شود، موادی که رس بالایی دارند نسبت به سنگ‌های توده‌ای<sup>۲</sup> دارای عمق نفوذ کمتری می‌باشند. این مسأله به دلیل رسانندگی بالاتر مواد حاوی رس نسبت به سنگ‌های توده‌ای است. در عمل استفاده از روش GPR در زمین‌های با مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم-متر) نامناسب است. این شرایط در محیط‌های سیلتی و رسی و در حضور آب‌های زیرزمینی شور مزه، حاکم است.

---

<sup>۱</sup> Cook

<sup>۲</sup> Massive



شکل ۲-۶: بیشترین عمق قابل بررسی در مواد زمین‌شناسی مختلف به صورت تابعی از فرکانس [Reynolds, 1997].

## ۲-۵- بازتاب و عبور

قسمتی از انرژی موج الکترومغناطیسی در برخورد با فصل مشترک دو محیط با ثابت دی-الکتریک متفاوت، عبور کرده و بخش دیگر بازتاب می‌شود. انرژی عبوری ممکن است توسط فصل مشترک‌های دیگر در زیر این لایه بازتاب شود و به همین ترتیب الی آخر. برخورد عمودی نشان دهنده استفاده از یک آنتن به عنوان فرستنده و گیرنده می‌باشد و در صورتی که از دو آنتن جدا از هم باشند، برای ارسال و دریافت امواج باید فاصله آنتن‌ها نسبت به هم کوچکتر از فاصله بازتاب‌کننده تا آنتن‌ها باشد.

بازتاب امواج به سبب تغییر در گذردهی نسبی در فصل مشترک دو محیط، باعث آشکارسازی فصل مشترک مزبور خواهد شد. تغییر در نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل،

تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت‌گیری و چینش<sup>۱</sup> آن‌ها، تماماً بازتاب‌های خوبی را باعث می‌شوند. در نتیجه پدیده‌هایی نظیر سطح ایستایی، ساختارهای رسوبی و مرز بین واحدهای سنگی، بایستی به خوبی توسط روش GPR قابل آشکار سازی باشد. ضریب بازتاب R تابعی از میزان تفاوت خواص الکتریکی بین این دو نوع ماده است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}} \quad (۱۱-۲)$$

که در آن  $K_1$  و  $K_2$ ، ثابت دی‌الکتریک دو محیط (یا ماده) ۱ و ۲ است. ضریب بازتاب همچنین به ضخامت لایه و فرکانس (و بنابراین طول موج) سیگنال تابشی بستگی دارد. علامت R وابسته به مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  می‌باشد. اگر موج از محیطی با ضریب دی‌الکتریک کم وارد محیطی با ضریب دی‌الکتریک بالا شود، R منفی می‌شود و برعکس [Howe., 2000]. برای به دست آوردن یک دید کمی از آنچه تا کنون درباره ضریب بازتاب گفته شد، توجه به جدول (۲-۲) می‌تواند بسیار راه گشا باشد. هر چه ضرایب بازتاب بزرگتر باشد انرژی‌ای که به گیرنده می‌رسد بیشتر بوده و فصل مشترک بهتر آشکار سازی می‌شود.

به عنوان مثال فصل مشترک خاک و فلز دارای ضریب بازتابی در حدود (۱-) می‌باشد، به این معنی که تمام انرژی موج ارسالی از این فصل مشترک بازتاب می‌شود. به همین دلیل فلزات مدفون در خاک، اهداف بسیار مناسبی برای آشکار سازی توسط GPR می‌باشند. فصل مشترک خاک و سنگ، دارای ضریب بازتاب پایین تری نسبت به دیگر فصل مشترک‌هاست. از اختلاف بین ضرایب بازتاب در این فصل مشترک‌ها، می‌توان در تفسیر داده‌های GPR استفاده کرد.

---

<sup>۱</sup>Packing

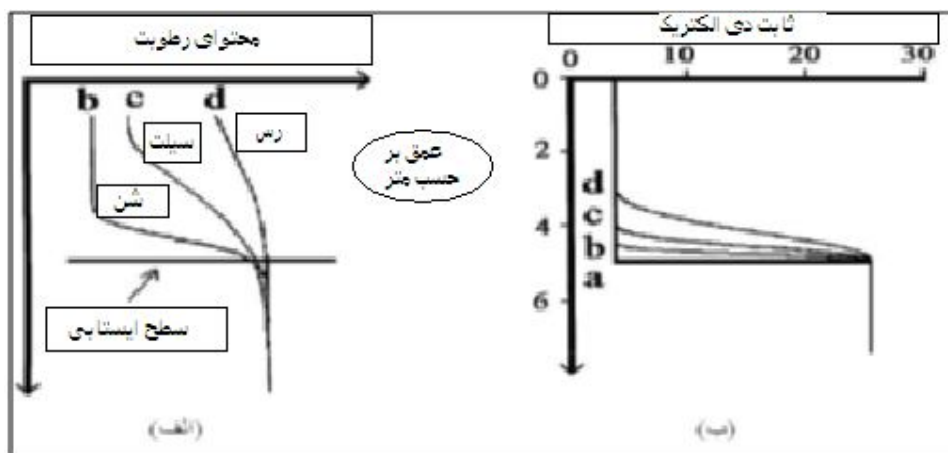
جدول ۲-۲: گذر دهی نسبی محیط‌های مختلف، به همراه ضرایب بازتاب محاسبه شده برای فصل مشترک آنها (علامت منفی به دلیل عبور موج از محیط با سرعت الکترومغناطیسی بالا به محیط کم سرعت می‌باشد) Zeng and McMechan., 1997.

فصل مشترک	$\epsilon_{r1}$	$\epsilon_{r2}$	ضریب بازتاب
هوا-خاک خشک	۱	۴	-۰/۳۳
هوا-خاک مرطوب	۱	۲۵	-۰/۶۷
خاک خشک-خاک مرطوب	۴	۲۵	-۰/۴۳
خاک خشک-سنگ	۴	۶	-۰/۰۱
خاک مرطوب-سنگ	۲۵	۶	۰/۳۴
یخ-آب	۳/۲	۸۱	-۰/۶۷
خاک مرطوب-آب	۹	۸۱	-۰/۵
خاک مرطوب-هوا	۹	۱	۰/۵
خاک خشک-فلز	۴	۳۰۰	۱-۱

## ۲-۶- منطقه گذار

نکته‌ای که در اینجا باید مورد توجه قرار گیرد، پهنای منطقه گذار است. منطقه گذار، منطقه‌ای است که در آن گذردهی دی‌الکتریک تغییر می‌کند [Neal., 2004]. هر چه پهنای این منطقه کمتر باشد و تغییر در گذردهی دی‌الکتریک تند و ناگهانی باشد، بازتاب امواج GPR شدت بیشتری خواهد داشت و این فصل مشترک راحت‌تر آشکارسازی می‌شود. در صورتی که اگر پهنای این منطقه نسبت به طول موج غالب امواج GPR بزرگ باشد، این فصل مشترک به خوبی آشکارسازی نمی‌شود و بیشتر انرژی سیگنال در این منطقه تلف می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از مرزهای تدریجی، می‌توان به سطح ایستابی اشاره کرد که وجود زون موئینه در بالای این سطح باعث این پدیده می‌شود. در این منطقه مرز بین منطقه خشک و اشباع به صورت تدریجی تغییر می‌کند. بسته به جنس سازند و دانه‌بندی سازند، پهنای این منطقه می‌تواند متفاوت باشد و همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، در رسوبات دانه ریز مانند رس‌ها و سیلت‌ها این منطقه دارای پهنای بیشتری است. از این رو اکتشاف سطح ایستابی معمولاً توسط آنتن‌های فرکانس پایین (طول موج بالا)، انجام می‌شود.





شکل ۲-۷: ضخامت منطقه گذار برای رسوبات با دانه بندی متفاوت (الف) به همراه مدل الکتریکی آن (ب) [Young and Sun., 1999].

## ۲-۷- قدرت تفکیک

قدرت تفکیک، توانایی تمیز دادن دو پدیده نزدیک به هم می‌باشد و قدرت تفکیک قائم توسط

طول موج کنترل می‌شود [Kearey and Brooks., 1991]

رابطه بین سرعت فرکانس و طول موج به صورت زیر است [Parasnis, 1997]:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2-12)$$

در این رابطه  $V$  سرعت موج GPR در محیط و  $f$  فرکانس آن می‌باشد.

هنگامی که موج در زمین منتشر می‌شود، مواد تشکیل دهنده زمین بر روی شکل و دامنه آن تأثیر گذاشته و اصطلاحاً آن را فیلتر می‌کند [Parasnis., 1997]. به همین دلیل، موجی که در زمین به سمت پایین حرکت می‌کند، دارای طول موجی بزرگتر از آن است که توسط کارخانه سازنده آن ارائه شده است. بنابراین فرکانس مرکزی بازگشتی (فرکانسی که در پالس‌های دریافتی در آنتن گیرنده بیشترین انرژی را دارد) به دلیل اتلاف بیشتر فرکانس‌های بالا، پایین‌تر از فرکانس مرکزی آنتن فرستنده می‌باشند و در نتیجه تخمین واقع‌گرایانه‌تری از قدرت تفکیک عمودی از فرکانس مرکزی بازگشتی قابل تخمین می‌باشد. بهترین قدرت تفکیک

عمودی ثبت شده در مواد کم اتلاف مانند شن و ماسه‌های خشک، با استفاده از آنتن‌های فرکانس بالا، مابین ۲ تا ۸ سانتیمتر است [Neal, 2004].

در مورد قدرت تفکیک افقی، عامل تأثیرگذار، فاصله افقی بین ردها می‌باشد که با افزایش این فاصله قدرت تفکیک افقی کاهش می‌یابد [Sensors & software., b, 1999].

فرکانس آنتن‌ها و خواص دی‌الکتریک زمین، میزان تفکیک‌پذیری فضایی قابل حصول را تعیین می‌کنند. برای فرکانس‌های مورد استفاده در سیستم‌های GPR استاندارد (۱۰۰۰-۱۲/۵ مگاهرتز) این فاصله از چند سانتیمتر تا چند متر تغییر می‌کند [Sensors & software, a, 1999].

در همه کاربردهای GPR یک رابطه بین عمق نفوذ و قدرت تفکیک وجود دارد. آنتن‌های با فرکانس بالا (طول موج کوتاه) قدرت تفکیک را افزایش می‌دهند ولی باعث کاهش عمق نفوذ می‌شوند. برای سیستم‌های GPR بیشترین قدرت تفکیک عمودی در عمقی به اندازه یک چهارم طول موج اتفاق می‌افتد یعنی [Reynolds, 1997].

$$Z = \frac{V}{4f} \quad (۱۳-۲)$$

که  $V$  سرعت موج در محیط انتشار و  $f$  فرکانس می‌باشد. [Howe, 2000].

در جدول ۲-۳ خلاصه‌ای از قدرت تفکیک تئوری و تغییرات در ابعاد ردپای رادار در سه فرکانس برای شن خشک با ثابت دی‌الکتریک ۴ و شن اشباع با ثابت دی‌الکتریک ۲۵ آورده شده است.

جدول ۲-۳: مقادیر ایده‌آل قدرت تفکیک و ردپای رادار که برای فرکانس‌های خاصی با استفاده از روابط ۲-۸، ۲-۹ و ۲-۱۳ به دست آمده‌اند [Howe., 2000].

فرکانس (MHZ)	بیشترین مقدار قدرت تفکیک $K=4 (m)$	بیشترین مقدار قدرت تفکیک $K=25 (m)$	رد پای رادار برای شن خشک $K=4 (m)$		رد پای رادار برای شن مرطوب $K=25 (m)$	
			X	Y	X	Y
۲۲۵	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۹۱	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۲۷
۴۵۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۷۵	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۱۹
۹۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۱۴

برای تمام فرکانس‌های در این دامنه (۲۲۵ تا ۹۰۰ مگاهرتز)، اثر افزایش محتوای آب محیط باعث کاهش ابعاد ردپای رادار می‌شود. افزایش رطوبت خاک باعث کاهش حجم خاک سهیم در بازگشت سیگنال می‌شود، که این اثر به علت فشردگی در امواج GPR می‌باشد. افزایش ثابت دی‌الکتریک مواد، باعث افزایش قدرت تفکیک می‌شود.

## ۲-۸- عوامل مؤثر بر ثابت دی‌الکتریک

استفاده از GPR برای جمع‌آوری اطلاعات خاک، نیازمند محاسبه مقادیر دی‌الکتریک می‌باشد. این مقادیر دی‌الکتریک به خواص خاک بستگی دارد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مهمترین پارامترهایی که پاسخ دی‌الکتریک مواد زمین شناسی را کنترل می‌کنند، عبارتند از: محتوای آب، تخلخل، محتوای رس و فرکانس اندازه‌گیری [Knoll and Knight., 1994]. ثابت شده است که محتوای آب خاک، بیشترین نقش را در مقدار ثابت دی‌الکتریک دارد. این موضوع به دلیل ساختار اتمی منحصربه‌فرد آب است که ثابت دی‌الکتریک بالایی (۸۰) در مقایسه با ثابت دی‌الکتریک دیگر مواد (۲۰-۳) دارد [Top et al., 1980]. مولکول‌های آب دوقطبی شده در پاسخ به میدان الکتریکی به خط می‌شوند و یک ثابت دی‌الکتریک بزرگ (در محدوده فرکانس-های رادار) تولید می‌کنند [Howe., 2000].

دیگر عواملی که بر مقادیر ثابت دی‌الکتریک تأثیر دارند شوری و دما هستند. تأثیر شوری از آن‌جا ناشی می‌شود که افزایش محتوای آب، منجر به افزایش یون‌های حل شده در آب می‌شود. تأثیر شوری در فرکانس‌های ۱۰۰۰ مگاهرتز و بالاتر، کم بوده و با کاهش فرکانس افزایش پیدا می‌کند و در فرکانس‌های زیر ۲۵ مگاهرتز افزایش شدیدی دارد [Wensink., 1993]. در محدوده فرکانسی ۱-۱۰۰۰ مگاهرتز دمای آب تأثیر مهمی بر نتایج ثبت شده ندارد ولی به محض یخ زدن آب، ثابت دی‌الکتریک آب به شدت افت کرده و تقریباً از ۸۰ به ۳ می‌رسد [Top et al., 1980].

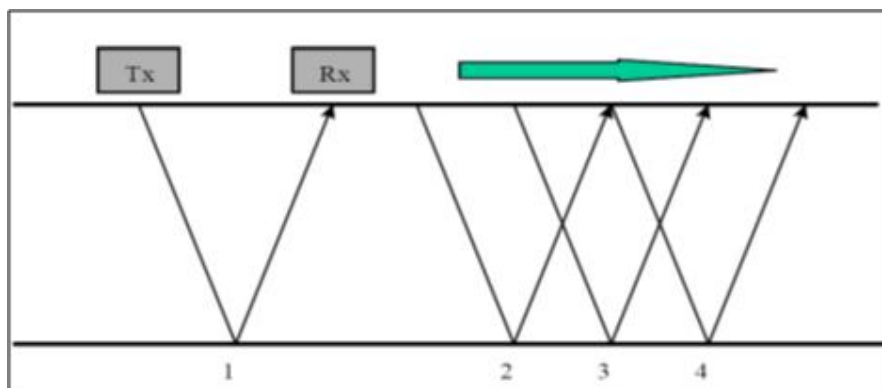
محتوای آب خاک، خود تابعی از تخلخل مفید و در نتیجه چگالی حجمی است. تخلخل بیشترین مقدار آب نگه داشته شده در خاک را کنترل می‌کند. Schmugge نشان داد که آرایش بافت نیز یک نکته مهم می‌باشد زیرا سرعت و در نتیجه فرکانس امواج الکترومغناطیسی تا مقدار زیادی توسط رطوبت آزاد نگه داشته شده در منافذ کنترل می‌شوند [Schmugge., 1980].

## ۲-۹- روش‌های برداشت داده‌های GPR

سه آرایش استاندارد برای برداشت داده‌های GPR وجود دارد که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها پیمایش بازتابی با فاصله ثابت<sup>۱</sup> است که در آن آنتن‌های فرستنده و گیرنده در فاصله ثابتی از هم روی زمین قرار می‌گیرند (شکل ۲-۸). با حرکت سیستم در سرتاسر منطقه مورد مطالعه، تغییرات فضایی در ترکیبات ساختارهای زیر سطحی مشخص می‌شود. پیمایش بازتابی با فاصله ثابت می‌تواند به سرعت داده‌ها را جمع‌آوری کرده و به‌عنوان یک پروفیل دوبعدی که می‌تواند بازتاب کننده‌های خطی و نقطه‌ای را از هم جدا کند، نمایش دهد. در واقع طبق بحث‌های قبلی زون پاسخ حجمی از خاک است نه یک نقطه تنها و بنابراین، اهداف مرکز سیستم در بازتاب سیگنال شرکت می‌کنند. این ویژگی منحصر به فرد روش GPR است که با پذیرش فرض بازتابنده‌های نقطه‌ای یک طرح اغراق آمیز تولید می‌کند [Howe., 2000].

---

<sup>۱</sup> Reflection survey-constant offset

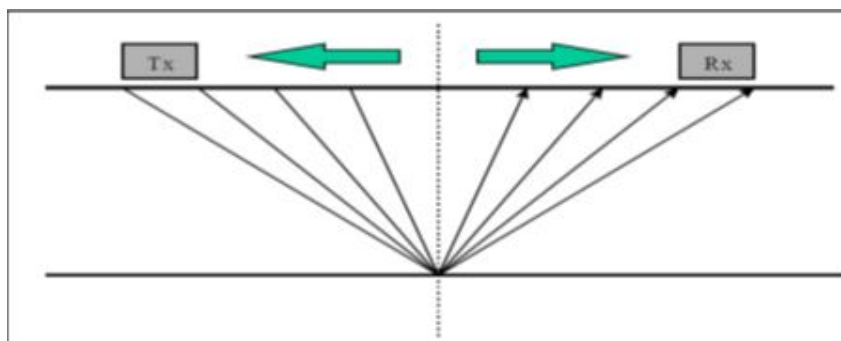


شکل ۲-۸: نحوه برداشت داده‌های GPR به روش پیمایش بازتابی با فاصله ثابت [Howe., 2000]

بررسی‌های GPR تغییرات در ویژگی‌های خاک را بر حسب زمان سیر بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده توصیف می‌کنند. عمقی که بازتابنده‌ها در آن هستند، توسط اندازه‌گیری سرعت پالس الکترومغناطیسی در محیط تعیین می‌شود. دو روش اندازه‌گیری سرعت عبارتند از: نقطه میانی مشترک<sup>۱</sup> (CMP) و پیمایش Transillumination.

در روش CMP در ابتدا آنتن‌ها بر روی زمین و در فاصله‌ای به اندازه یک گام حرکتی از هم قرار می‌گیرند. سپس هر آنتن به اندازه نصف گام حرکتی به سمت خارج (در جهت افزایش فاصله آنتن‌ها) حرکت می‌کند (شکل ۲-۹). افزایش فاصله بین آنتن‌ها (x) باعث طولانی‌تر شدن زمان سیر (t) می‌شود. بوسیله مقایسه تغییرات در فاصله آنتن‌ها بر حسب زمان لازم برای بازگشت پالس از بازتابنده، تخمینی از سرعت برای هر لایه بدست می‌آید. از محاسبه شیب نمودار حاصل از رسم  $x^2$  بر حسب  $t^2$  سرعت اندازه‌گیری می‌شود. یک فرض اساسی در روش CMP این است که بازتاب کننده‌های خطی زیر سطح افقی هستند اگر بازتاب کننده‌ها شیب زیادی نسبت به سطح زمین داشته باشند، زمان انعکاس تنها تابعی از فاصله فرستنده و گیرنده نبوده و با تغییر عمق بازتابنده نیز تغییر می‌کند [Howe., 2000].

<sup>۱</sup> Common midpoint

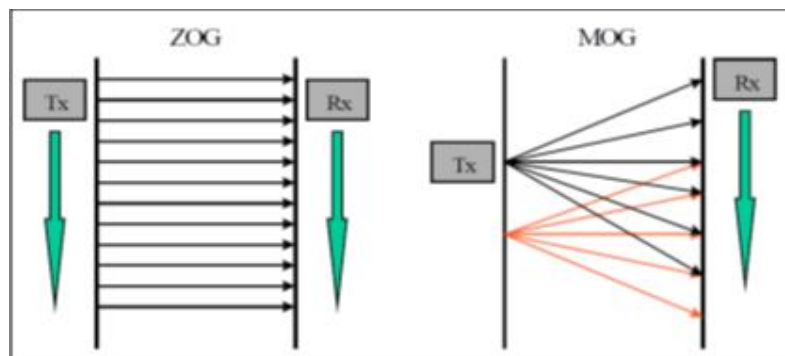


شکل ۲-۹: نحوه برداشت داده‌های GPR با روش CMP [Howe, 2000].

پیمایش Transillumination به صورت شماتیک در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک فاصله افقی ثابت از هم جدا شده‌اند و در حالی که با هم موازی هستند به صورت قائم حرکت می‌کنند. این روش خود به دو روش تقسیم می‌شود: روش جمع‌آوری داده با دور افت یا فاصله صفر<sup>۱</sup> (ZOG) که در آن آنتن‌های فرستنده و گیرنده اختلاف ارتفاعی ندارند و روش جمع‌آوری داده با دور افت یا فواصل متعدد<sup>۲</sup> (MOG) که نیازمند این است که یکی از آنتن‌ها ثابت باشد و دیگری در راستای قائم حرکت کند این روش به علت عبور پالس از مسیرهای چندگانه تصویری با جزئیات بیشتر ارائه می‌کند. روش Transillumination برای مدل‌سازی داخلی ساختارهای جامد از قبیل بلوک‌های بتنی استفاده می‌شود [Gilson et al, 1996]. تغییرات در سرعت انتشار امواج در بین آنتن‌ها، تغییرات در مقادیر دی‌الکتریک که ممکن است مربوط به تغییرات در پارامترهای هیدرولوژیکی باشد را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Zero offset gather

<sup>۲</sup> Multiple offset gather



شکل ۲-۱۰: نحوه برداشت داده های GPR با استفاده از روش ZOG و MOG [Howe., 2000]

## ۲-۱۰- به دست آوردن سرعت در ساختارهای زیر سطحی

به دست آوردن عمق از پروفیل های GPR، با تکیه بر تخمین دقیق سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی که از لایه عبور می کنند، انجام می شود. روش CMP یک روش استاندارد برای به دست آوردن سرعت می باشد. برنامه تحلیل سرعت بر این اساس پایه گذاری شده است که وقتی فاصله بین فرستنده و گیرنده افزایش پیدا می کند، زمان سیر سیگنال به صورت هیپربولیکی تغییر می کند. با استفاده از روش CMP داده های جمع آوری شده، مقادیر  $x$  بر حسب  $t$  نمایش داده می شوند که نمودار به دست آمده، تغییرات هیپربولیک  $t$  بر حسب  $x$  را نشان می دهد. عکس شیب نمودار رسم شده برای بازتابنده که در آن  $t^2$  بر حسب  $x^2$  نمایش داده شده، معادل میانگین مقدار سرعت، از زمان صفر (سطح زمین) تا وقتی که موج به زمین می رسد می باشد و اصطلاحاً جذر میانگین مجذور سرعت نام دارد [Reynolds., 1997].

$$v_{rms} = \left( \frac{x_2^2 - x_1^2}{t_2^2 - t_1^2} \right)^{1/2} \quad (2-14)$$

که در آن  $V_{rms}$  جذر میانگین مجذور سرعت می باشد.

سرعت واقعی لایه می‌تواند با استفاده از معادله دیکس<sup>۱</sup> تخمین زده شود. این معادله مقدار دقیق تری برای ضخامت خاک محاسبه می‌کند. از معادله دیکس برای سرعت‌های بدست آمده از روش CMP یک سرعت داخلی متناظر به دست می‌آید. سرعت داخلی بعداً برای تبدیل پروفیل زمانی به عمقی استفاده می‌شود [Dix., 1995].

$$v_{int} = \left[ \frac{(v_{rms.n})^2 T_n - (v_{rms.n-1})^2 T_{n-1}}{T_n - T_{n-1}} \right]^{1/2} \quad (15-2)$$

که در آن  $V_{rms.n}$  و  $V_{rms.n-1}$  به ترتیب جذر میانگین مجذور سرعت برای لایه  $n$ ام و  $(n-1)$ ام می‌باشند و  $T_n$  و  $T_{n-1}$  زمان رفت و برگشت از  $n$ امین و  $(n-1)$ امین بازتابنده هستند.

## ۲-۱۱- از حوزه زمان به حوزه عمق

به دست آوردن تخمین دقیقی از عمق بازتابنده با استفاده از GPR، نیازمند آن است که زمان رفت و برگشت ( $T$ ) با استفاده از مقدار سرعت در لایه‌ی بالایی بازتابنده مورد بحث، به مقدار عمق تبدیل شود. در بیشتر موارد این کار ساده است و با ضرب نصف  $T$  در سرعت  $v$ ، عمق بازتابنده ( $d$ ) به دست می‌آید یعنی:

$$d = \left( \frac{T}{2} \right) \times v \quad (16-2)$$

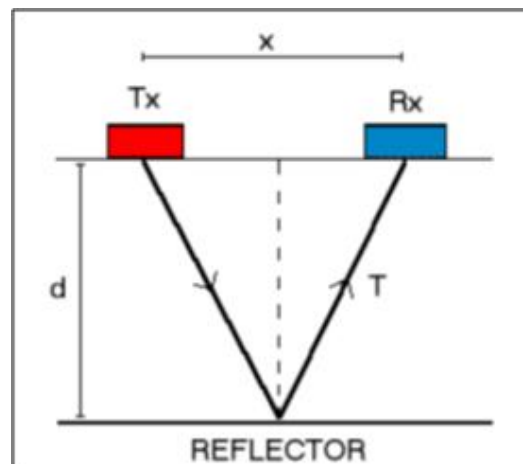
به علت فاصله‌ای که بین فرستنده و گیرنده در دستگاه‌های دو آنتن وجود دارد، مسیر وارد شدن و خارج شدن پالس به صورت عمودی نیست و این مسیر یک مثلث متساوی‌الساقین را تشکیل می‌دهد و بازتابنده در زیر سطح و در حد واسط بین فرستنده و گیرنده قرار دارد (شکل ۲-۱۱). بنابراین عمق واقعی بازتابنده ( $d$ ) مقداری کمتر از نصف زمان رفت و برگشت می‌باشد. اگر عمق بازتابنده زیاد باشد به طوری که مسیر رفت و برگشت سیگنال به  $2d$  نزدیک باشد، تخمین عمق بازتابنده با استفاده از رابطه بالا معتبر است ولی در عمق‌های کم این اتفاق نمی‌افتد و مسیر

<sup>۱</sup> Dix



رفت و برگشت سیگنال از  $2d$  خیلی طولانی تر است. در این موارد معادله بالا عمقی بیش از عمق واقعی بازتابنده را تخمین می زند. برای حل این مشکل بهتر است که از رابطه زیر استفاده شود [Howe, 2000]:

$$d = \left[ \left( \frac{T}{2} \times v \right)^2 - \left( \frac{x}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17-2)$$



شکل ۱۱-۲: مسیر حرکت سیگنال در روش GPR [Howe., 2000]

## ۱۲-۲- پردازش داده‌های GPR

نرم افزارهای موجود برای پردازش داده‌های GPR می‌توانند پردازش‌های محدودی را روی پروفیل، بدون ایجاد تغییر در دامنه داده‌ها اعمال کند. در اینجا برخی از این پردازش‌ها معرفی می‌شوند.

### ۱-۱۲-۲- تصحیح جابجایی صفر زمانی

به دلیل کج شدگی اولین رویداد در پروفیل‌های بازتابی GPR، مجموعه نرم افزارهای GPR معمولاً این به خط شدگی را به صورت اتوماتیک با جابجایی هر رد به صورت جداگانه، انجام

می‌دهند. این خطا زمانی که نمایشگر الکترونیکی به شدت سردتر و یا گرم‌تر از دمای محیط اطراف باشد، رخ می‌دهد. کابل‌های آسیب دیده نیز می‌توانند باعث بوجود آمدن این خطا باشند، که در این صورت این خطا نامنظم است [Sensors & software, c, 1999]. برای این منظور یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد در این نرم افزارها به کار می‌رود که به واسطه آن اولین رویداد (موج مستقیم هوا) را تشخیص دهند. مشکلی که در استفاده از این مقدار زمینه وجود دارد، استفاده از آن در مناطق با نوفه بالا می‌باشد. به این ترتیب که ممکن است تشخیص اولین رویداد در تمامی ردها به علت وجود نوفه موفق نباشد. به خط شدگی موفقیت آمیز رویدادها باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش درآیند. از این رو اولین پردازش مورد استفاده بر روی داده‌ها، تصحیح جابجایی صفر زمانی می‌باشد.

## ۲-۱۲-۲- تصحیح اشباع سیگنال<sup>۱</sup>

به علت فواصل زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم عمق ناشی می‌شوند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود [Neal, 2004]. این مسئله باعث به وجود آمدن یک زوال آهسته فرکانس پایین که به wow معروف است، بر روی ردها می‌گردد. در واقع wow اصطلاحی است که برای پالس‌های اولیه فرستاده شده کم فرکانس، که به آرامی و به مرور زمان محو می‌شوند، به کار برده می‌شود و برای همه داده‌های GPR وجود دارد و به مشخصات الکتریکی زمین و جدایی آنتن‌ها بستگی دارد. [Sensors & software., b, 1999]

اولین پردازش روی داده‌ها dewow همیشگی همه پروفیل‌های GPR است. این مؤلفه کم فرکانس می‌تواند توسط یک فیلتر بالاگذر حذف شود که برای این منظور هم می‌توان از فیلتر

---

<sup>۱</sup> Signal saturation

dewow و هم از فیلتر Dc-Shift استفاده کرد. استفاده از فیلتر Dewow ممکن است مشکلاتی را نیز به همراه داشته باشد. اول اینکه باعث ایجاد یکسری نوسانات اضافی در ابتدا و انتهای رویدادها شود و دومین مشکل زمانی بوجود می آید که اندازه wow بزرگ باشد. این موضوع باعث می شود که بعد از اعمال فیلتر Dewow یکسری مکان های بدون اعوجاج و اصطلاحاً مکان های خالی روی ردها دیده شود. برای رفع مشکل اول می توان از یک فیلتر بالاگذر دیگر مانند Dc-Shift استفاده کرد. این فیلتر ممکن است در استفاده از آنتن های با فرکانس بالا بسیار مفیدتر از Dewow باشد. اما در مورد مشکل دوم راه حل نرم افزاری برای رفع این مشکل وجود ندارد و با افزایش فاصله آنتن ها مقدار wow را کاهش می دهیم. برای این منظور استفاده از فواصلی به اندازه طول آنتن های به کارگرفته شده، می تواند راهکار مناسبی باشد [Sensors & Software, a, 1999].

## ۲-۱۲-۳- بهره ها<sup>۱</sup>

توان سیگنال انتشاری در توده های زیر سطحی با افزایش زمان پیمایش سیگنال مربوطه، به صورت تصاعدی کاهش می یابد. به همین دلیل پاسخ دریافتی از توده های عمیق، ضعیف تر می باشد. برای حل این مشکل با اعمال بهره بر روی داده ها، توان سیگنال در اعماق بیشتر را افزایش می دهیم. بهره ها ممکن است به صورت یک ضریب ثابت برای دامنه همه داده های خام و یا به صورت یک تابع تغییرات زمانی باشند. بهره تغییرات زمانی، افزایش پراکندگی و اتلاف انرژی پالس فرستاده شده را توسط افزایش زمان سیر بهبود می بخشد. به عنوان یک نتیجه از این اثرات، بازتابنده هایی که زمان سیر طولانی تری دارند، در مقایسه با بازتابنده هایی که زمان سیرشان کوتاه تر است، دامنه کوچکتری دارند [Fisher et al, 1996]. دو تابع تغییرات زمانی که

---

<sup>۱</sup> Gain

در نرم افزار Winn Ekko\_Pro (این نرم افزار به صورت مختصر در پیوست الف توضیح داده شده است) وجود دارد عبارتند از: جبران گسترش نمایی<sup>۱</sup> (SEC) و کنترل بهره اتوماتیک<sup>۲</sup> (AGC). استفاده از بهره‌ها راه مناسبی برای نمایش داده‌هاست، ولی نباید تأثیرات نامطلوب آن را در برجسته کردن نوفه‌های محیطی و سیستماتیک نادیده گرفت. استفاده از بهره بایستی با دقت انجام شود تا اطلاعات مربوط به ساختارهای زیر سطحی بدون به وجود آمدن مشکل، به دست آیند.

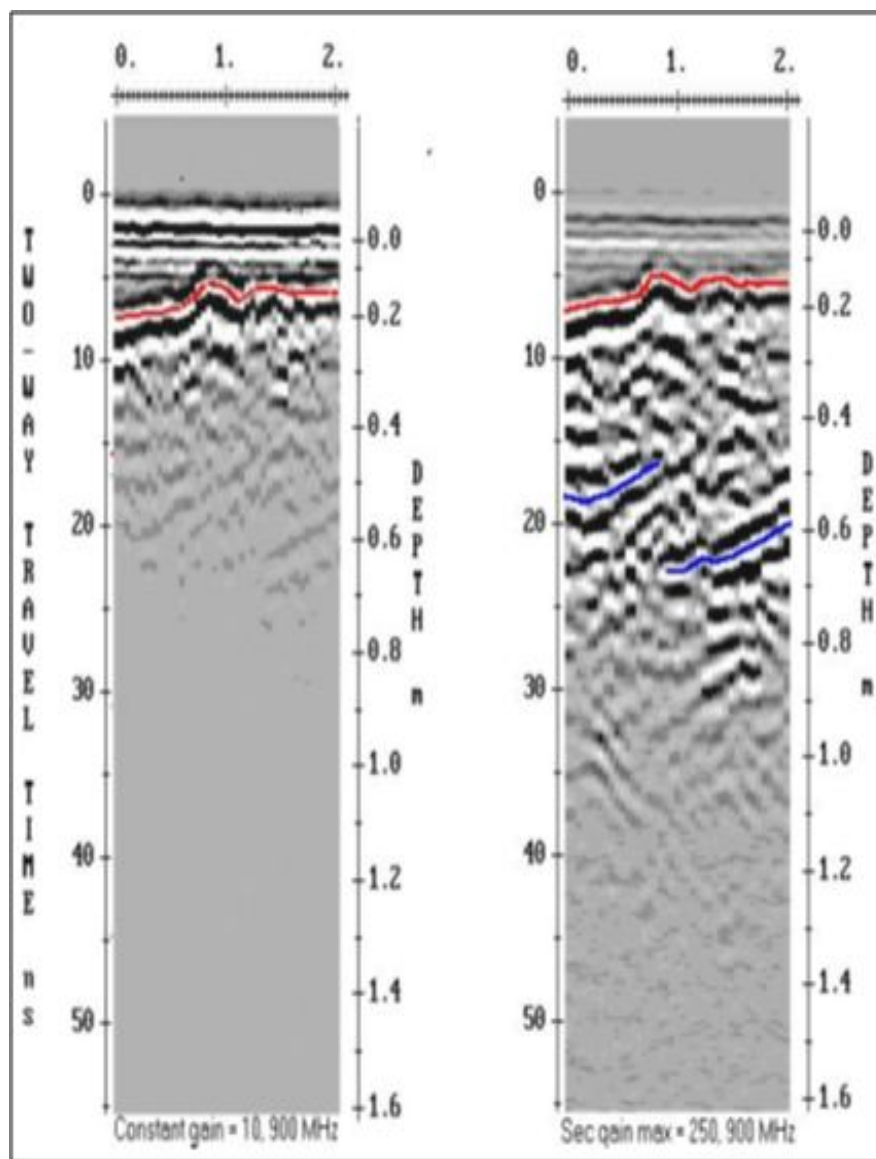
در بررسی‌های رسوب‌شناسی، به نقشه درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است. از این رو در بیشتر مطالعات رسوب‌شناسی از بهره AGC استفاده می‌شود. این بهره به طور معکوس با توان سیگنال متناسب است و بهره را تا حدودی که کاربر تعریف می‌کند، بر روی داده‌ها اعمال می‌کند. از این رو سعی در یکسان‌سازی تمام سیگنال‌ها دارد [Sensors & Software, b, 1999]. همان‌طور که گفته شد، فصل مشترک‌های مختلف دارای توان‌های بازتابی مختلفی بوده و هر یک مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می‌نمایند. به این ترتیب در صورت استفاده از بهره AGC، اطلاعات به دست آمده از دامنه نسبی سیگنال‌ها از بین خواهد رفت. این اطلاعات در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند بوده و برای حفظ آن‌ها از انواع مختلف بهره‌ها نظیر بهره SEC استفاده می‌شود. در شکل ۲-۱۲ نمونه‌ای از استفاده از این بهره و مقایسه آن با بهره ثابت آورده شده است. بهره SEC ترکیبی از بهره خطی و نمایی است. این بهره با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد. در استفاده از این بهره پارامترهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد، بسیار حائز اهمیت است. این پارامترها از جمله ماکزیمم مقدار بهره که روی داده‌ها

---

<sup>۱</sup> Spreading and Eponential Compensating

<sup>۲</sup> Automatic Gain Control

اعمال می‌شود و همچنین اتلاف امواج GPR در محیط، برای بازسازی شکل بازتاب‌ها بسیار با اهمیت می‌باشند [Sensors & software., a, 1999]. استفاده از این بهره باعث حفظ اطلاعات مربوط به دامنه نسبی می‌شود.



شکل ۲-۱۲: مقایسه میزان نمایش جزئیات پروفیل هنگام استفاده از بهره ثابت و بهره SEC [Howe., 2000]

## فصل سوم

### عملیات برداشت

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل، عملیات برداشت داده‌های GPR در ناحیه جنوب شرقی دریای خزر به تفصیل تشریح شده است.

دریای خزر به عنوان بزرگترین حوضه آبی داخل خشکی، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی از نظر رسوب‌شناسی و اقیانوس‌شناسی است. یکی از مهمترین ویژگی‌های هیدرولوژی دریای خزر، نوسان تراز آب آن است. پس از جداسدن خزر از دریاچه‌های آزاد تا کنون، تراز آب آن حدود ۱۵۰ متر نوسان داشته است. حتی در دهه‌های اخیر نیز بارها تراز آب خزر پیش‌روی و پس‌روی را تجربه کرده است [Kroonenberg et al., 2000].

خلیج گرگان با مساحتی حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع بزرگترین خلیج در حاشیه جنوبی دریای خزر است که بر اثر پیش‌روی و گسترش شرقی رشته ساحلی شبه جزیره میان‌کاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. طول خلیج گرگان در حدود ۶۰ کیلومتر و عرض آن بین ۱۲ تا ۱۴ کیلومتر در نوسان است. این خلیج با عمق متوسط ۴ متر بیش از ۲۰۰۰ میلیون متر مکعب آب را در خود جای داده است [رحیم پور انارکی، ۱۳۸۵].

هیدرودینامیک خلیج گرگان تابع هیدرودینامیک عمومی دریای خزر و مقدار دبی خروجی رودخانه‌های منطقه می‌باشد. به واسطه توپوگرافی کم شیب این سواحل، کمترین تغییر در تراز آب دریا منجر به صدها متر جابجایی در خط ساحلی خواهد شد، به طوری که پس از عقب نشینی آب دریا در سال‌های اخیر، هنوز بخش قابل ملاحظه‌ای از ساحل قدیمی در زیر آب قرار دارد [علیزاده کتک لاهیجانی، ۱۳۸۱].

نوسانات آب دریای خزر شامل سه دسته نوسانات موقت (تحت تأثیر باد و جریان‌های دریایی)، نوسانات فصلی (در اثر طغیان یا کاهش آب ورودی رودخانه‌ها و تغییرات دمای آب) و نوسانات دراز مدت یا تغییرات دهه‌ای و قرنی (در اثر تغییرات جوی و اقلیمی) می‌باشد. تالاب انزلی و

خلیج گرگان دو نقطه کلیدی در سواحل جنوبی خزر برای ارزیابی تغییرات آب دریای خزر می- باشند [رحیم پور انارکی، ۱۳۸۵].

### ۳-۲- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی ناحیه مورد مطالعه

ناحیه مورد بررسی در این مطالعه در دو ورقه  $\frac{1}{100,000}$  گرگان و بهشهر واقع شده است. در شکل ۳-۱ بخشی از نقشه زمین شناسی بهشهر و در شکل ۳-۲ نیز بخشی از نقشه زمین شناسی گرگان نشان داده شده است. در زیر اشاره‌ای اجمالی به وضعیت زمین شناسی سطحی این ناحیه می‌کنیم.

#### ۳-۲-۱- زمین شناسی ناحیه بهشهر

ورقه بهشهر در محدوده عرض‌های جغرافیایی  $36^{\circ}30'$  تا  $37^{\circ}00'$  و طول‌های جغرافیایی  $53^{\circ}30'$  تا  $54^{\circ}00'$  قرار گرفته است. از دیدگاه ریخت شناسی این ورقه واحدهای ریخت زمین ساختی مهمی را در بر می‌گیرد، که از جنوب به شمال عبارتند از: بلندی‌ها و دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز، دشت خزر، تالاب گرگان، شبه جزیره میان کاله (میان قلعه)، جزیره آشور (آشوراده) و دریای خزر.

نواحی‌ای که در این ورقه عملیات برداشت در آن‌ها صورت گرفت، شامل نهشته‌های تالابی، نهشته‌های تلماسه‌ای و نهشته‌های کرانه‌ای می‌باشد.

#### ۳-۲-۱- الف- نهشته‌های تالابی

این واحد از رسوبات ریز دانه (فورش و رس) تشکیل شده است. رنگ این نهشته‌ها خاکستری تیره تا خاکستری روشن و سفید است و لایه بندی مشخصی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود. این رسوبات در محیط تالابی خلیج گرگان در هنگام بالاتر بودن سطح آب دریای خزر نهشته شده-



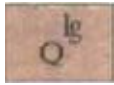
اند. به علت مطابقت مرز جنوبی رخنمون این واحد با تراز پیشنهاد شده برای پیشروی خزر در مرحله نئوکاسپین، می توان این رسوبات را هم‌ارز نهشته‌های نئوکاسپین (حدود ۸ تا ۱۰ هزار سال پیش به این سو) در نظر گرفت.

### ۳-۲-۱-ب- نهشته‌های تلماسه‌ای

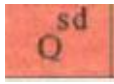
این واحد به شبه جزیره میان‌کاله تعلق دارد و شامل ماسه‌هایی است که از دریای خزر (در شمال شبه جزیره) منشأ گرفته‌اند و در اثر وزش دائمی باد، انتقال می‌یابند.

### ۳-۲-۱-ج- نهشته‌های کرانه‌ای

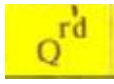
این واحد شامل ماسه‌هایی است که به‌طور فعال در کرانه امروزی دریای خزر و خلیج گرگان نهشته گردیده‌اند. رسوبات مزبور در کرانه‌های خزر از جنس ماسه نسبتاً خالص هستند اما در کرانه‌های خلیج گرگان ریز دانه‌تر و پر از خرده صدف می‌باشند.



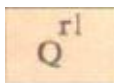
Lagoonal deposit (Neocaspian deposit)



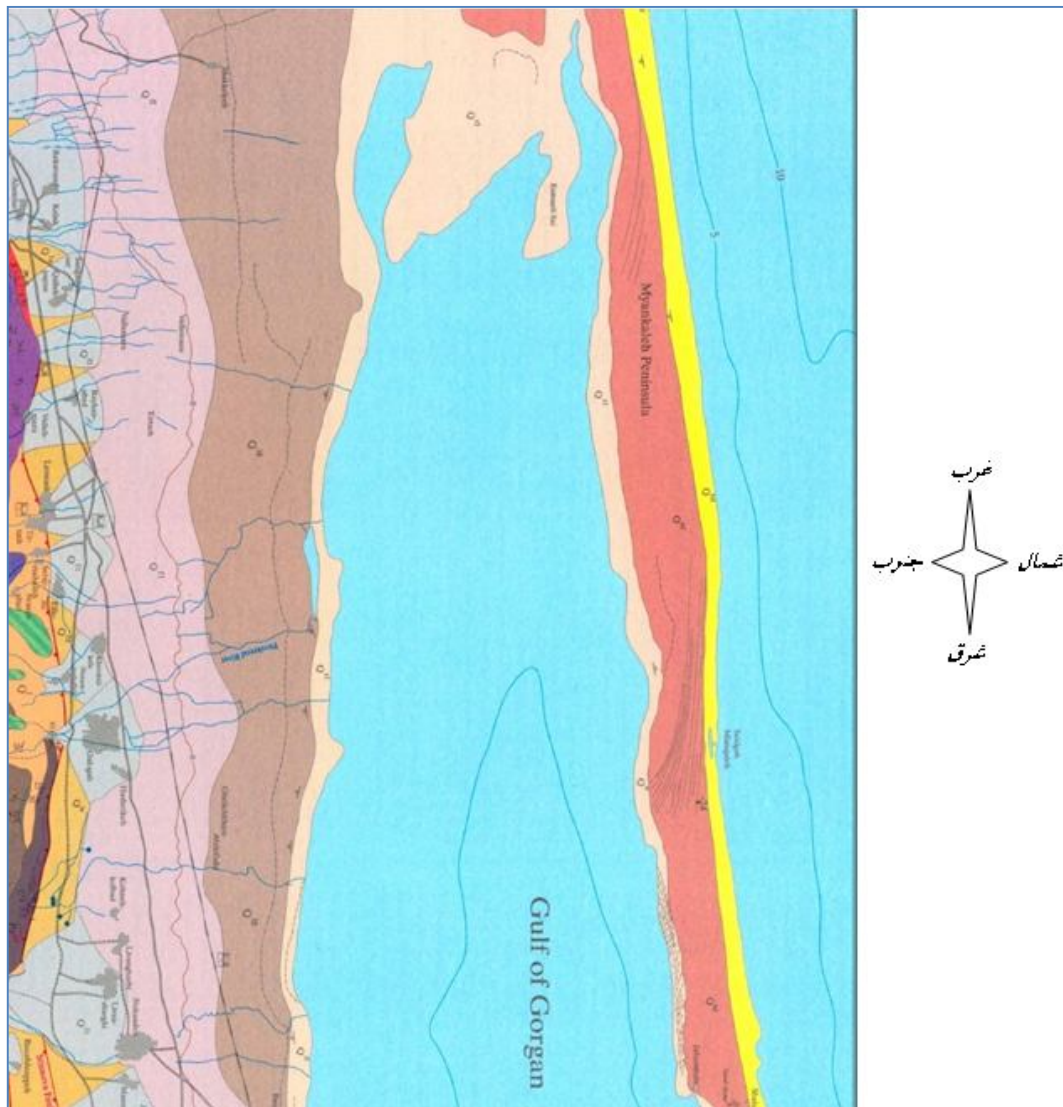
Sand dune deposit



Recent shore deposit



Recent lagoonal deposit



شکل ۳-۱: بخشی از نقشه زمین‌شناسی بهشهر به همراه راهنما [www.Ngdir.com]

### ۳-۲-۲- زمین شناسی ناحیه گرگان

ورقه گرگان در مختصات جغرافیایی 54°00 تا 54°30 طول‌های خاوری و 36°30 تا 37°00 عرض‌های شمالی واقع شده است. از مهمترین رودخانه‌های ناحیه مورد بررسی، رودخانه‌های گرگان، قره سو و نکا می‌باشد.

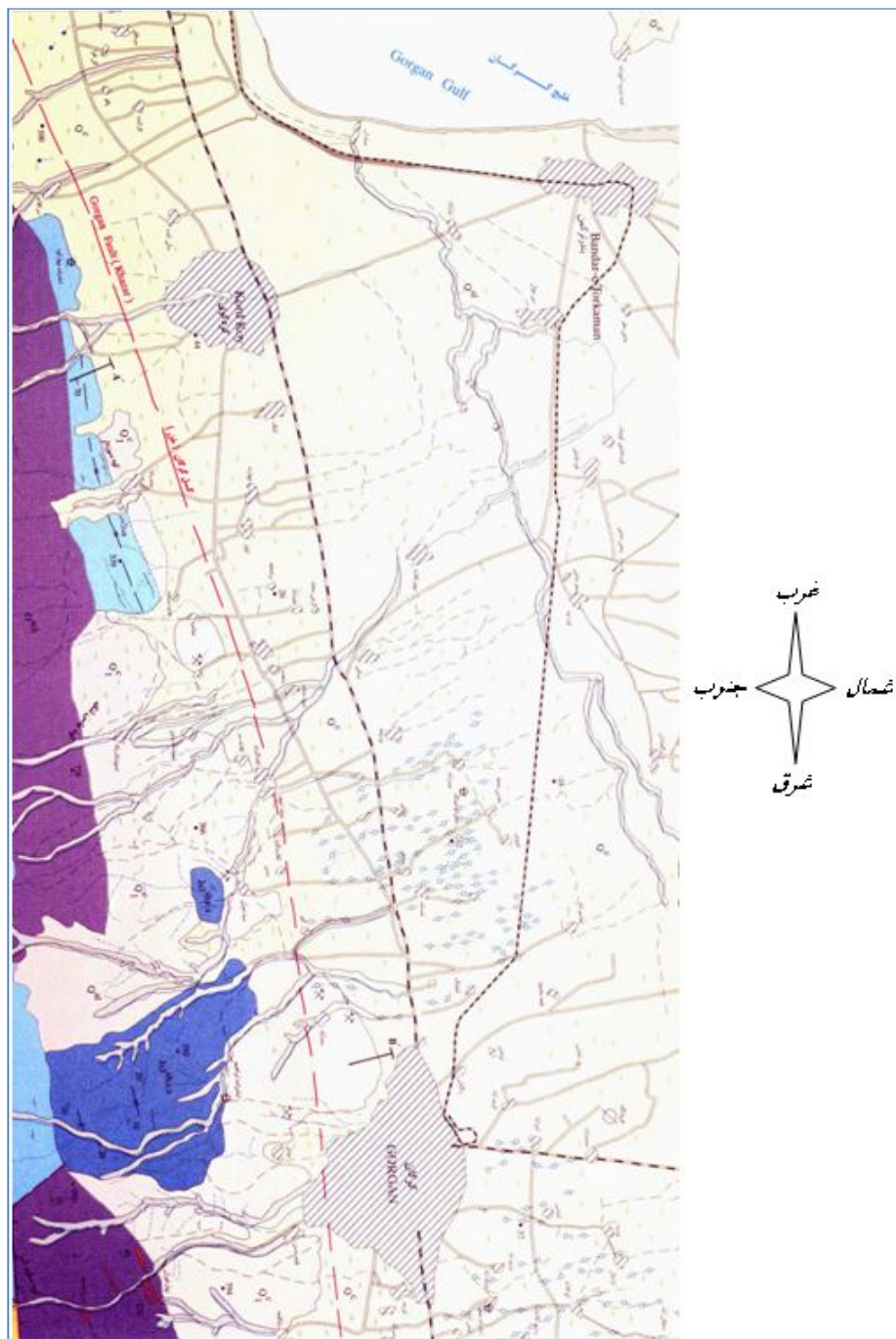
بر پایه تقسیمات اقلیمی ایران، آب و هوای ناحیه گرگان در شمال رشته کوه‌های البرز از نوع معتدل خزری بوده، میانگین درجه حرارت در زمستان‌ها ۸ درجه سانتی‌گراد بالای صفر و در تابستان‌ها به ۲۶ درجه بالای صفر می‌رسد. میزان بارندگی سالانه ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر، پرباران‌ترین ماه‌های سال ماه‌های فصول پاییز و زمستان و میانگین رطوبت در فصول سرد ۷۸ درصد و در فصول گرم ۷۱ درصد می‌باشد.

ناحیه‌هایی که در این مطالعه در این ورقه عملیات برداشت در آن‌ها صورت گرفت، شامل نهشته‌های رودخانه‌ای عهد حاضر که جوان‌ترین واحد ردیف‌های کواترنری می‌باشند، کفه گل نمکی (نمک و رس سیلتی) که در پیرامون دریاچه خزر رخنمون دارد و کفه رسی (عمدتاً رسی، سیلت و ماسه) می‌باشد.

### ۳-۲-۲-الف- کفه رسی

این واحد در برگیرنده کفه‌های رسی (بطور عمده رس وسیلت) و ماسه (شبه جزیره آشوراده) است که در سطح هوا زده و به رنگ کرم متمایل به سفید می‌باشد و به طور عمده در شمال گسل گرگان (خزر) فرورفتگی دشت گرگان را با گسترش شرقی-غربی فراگرفته است. در محدوده ورقه گرگان ضخامت این واحد در حدود ۳۰ تا ۵۰ متر می‌باشد که می‌توان آن را هم‌ارز نهشته‌های خزر جدید دانست.

- $Q^{sm}$  Salty mud flat (salt and silty clay)
- $Q^{al}$  Recent river deposits
- $Q^c$  Clay flat (mainly clay, silt and sand)



شکل ۲-۳: بخشی از نقشه زمین‌شناسی گرگان به همراه راهنما [www.Ngdir.com]

در شکل ۳-۳، عکس هوایی ناحیه‌ای که در آن عملیات برداشت داده انجام شده است دیده می‌شود، که شامل بخشی از سواحل جنوب شرقی دریای خزر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این عکس هر دو منطقه گرگان و بهشهر را در بر می‌گیرد.



شکل ۳-۳: عکس هوایی ناحیه مورد مطالعه [www.Googleearth.com]

### ۳-۳- برداشت داده‌ها

عملیات برداشت داده‌ها بر روی ۳۴ پروفیل طراحی شده با طول‌های مختلف در منطقه مورد نظر در تابستان سال ۱۳۸۸ انجام شد.

### ۳-۴- ویژگی‌های دستگاه GPR مورد استفاده در برداشت پروفیل‌ها

داده‌ها توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند. دستگاه مذکور از آنتن پوششی ۲۵۰ مگاهرتز برای ارسال پالس‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند و با توجه به نوع طراحی آن برای مطالعه در محیط‌های شهری مناسب‌تر است و در مناطقی که دارای پوشش گیاهی نظیر بوته‌زار، علفزار و... یا مناطق ناهموار نظیر مناطق با

پوشش گراول، حرکت آن با مشکل مواجه است. فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده در حدود ۳۰ سانتیمتر می باشد که این فاصله ثابت است و همین مسئله عمق نفوذ دستگاه را محدود می‌کند. مجموعه آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک محفظه از جنس پلاستیک فشرده قرار دارند. یک باتری قابل شارژ، نیرو محرکه لازم را برای ارسال امواج فراهم می‌کند. امواج ارسال شده توسط گیرنده دریافت شده و در یک رایانه که روی دستگاه سوار است ذخیره می‌شوند و مانیتور این رایانه امکان مشاهده داده‌ها را همزمان با برداشت، فراهم می‌کند. تمامی این مجموعه بر روی کالسکه‌ای چهارچرخ نصب می‌باشد.

از دیگر ویژگی‌های این دستگاه فاصله بسیار کم آنتن با سطح زمین است که این مسئله میزان نویز دریافتی از محیط اطراف را بسیار کاهش می‌دهد، هرچند این فاصله کم، حرکت دستگاه را در سطوح ناهموار و مناطق با پوشش گیاهی به شدت دچار مشکل می‌نماید. به همین دلیل لازم است در چنین مناطقی به کمک ابزارهای مناسب مسیر حرکت دستگاه را تا حد امکان هموار نمود.

### ۳-۵- پروفیل‌های برداشت شده

به طور کلی در طی این عملیات ۳۴ پروفیل با طول‌های مختلف برداشت گردید که برخی از آن‌ها به علل مختلف تکراری بوده‌اند. طول پروفیل‌ها از کمتر از ۵۰ متر تا بیش از ۱۶۰۰ متر متفاوت بوده است. طولانی‌ترین پروفیل مربوط به پروفیل میان‌کاله با طول بیش از ۱۶۸۰ متر و کوتاه‌ترین پروفیل مربوط به مقطع آشوراده می‌باشد. مهمترین عامل در تعیین طول پروفیل‌ها، وجود یا عدم وجود موانع و نیز مشاهده یا عدم مشاهده عوارض تحت الارضی می باشد. به دلیل پاره‌ای ملاحظات از ارائه محل دقیق پروفیل‌ها معذوریم.

### ۳-۶- نحوه برداشت پروفیل‌ها

در برداشت پروفیل‌ها دستگاه باید با سرعتی ثابت و آرام (در حد قدم زدن آهسته) حرکت داده شود. بهتر است نقطه شروع و نقطه پایان به کمک یک شاخص ثابت، مشخص شود. برای این منظور در برداشت از میخ چوبی استفاده شد. بدیهی است که نقاط شروع و پایان با کمک GPS موقعیت سنجی گردیدند. در پروفیل‌های طولانی بهتر است از تعدادی نقاط کنترلی نیز در میان مسیر استفاده گردد تا انحراف‌های احتمالی از خط مستقیم و تخمین فواصل به شکل بهتری صورت گیرد. بعلاوه در هر نقطه‌ای که به علت وجود موانع یا به هر دلیل دیگر ناچار به تغییر جهت مسیر هستیم باید از نقاط کنترلی استفاده گردد و یا اینکه این مسیرها به صورت پروفیل جدید تعریف گردند.

## فصل چهارم

# پردازش و تفسیر داده‌های GPR



#### ۴-۱- مقدمه‌ای در مورد تفسیر چینه شناختی

تفسیر چینه شناسی داده‌های GPR را می‌توان یک نمونه از تفسیر کیفی این داده‌ها دانست. چندی بعد از درک این مطلب که GPR می‌تواند اطلاعات مفیدی از رسوب شناسی در اختیار رسوب شناسان قرار دهد، پیشنهاد شد که اصول چینه شناسی لرزه‌ای برای تفسیر پروفیل‌های GPR به کار رود. چینه شناسی لرزه‌ای توسط صنایع نفت و در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت [Neal., 2004]

تحلیل چینه شناسی لرزه‌ای همان تحلیل مقاطع لرزه‌ای بصورت سکانس بازتابی و آشکارسازی سکانس‌های رسوبی می‌باشد. در این صورت لایه‌های رسوبی که هم‌زمان و یا در برهه‌ای از زمان تشکیل شده‌اند، به وسیله یک فصل مشترک خاص بصورت افقی، مایل و یا سطوح ناهماهنگ از یکدیگر جدا شده‌اند و با یک مشخصه چینه‌ای تعریف می‌شوند. این ساختارهای چینه‌ای از نظر منشأ با رسوبات اطراف خود متفاوت بوده و با شکل مشخصی در مقاطع لرزه‌ای دیده می‌شوند [قاسم‌العسگری، ۱۳۸۳]. رخساره‌های لرزه‌ای<sup>۱</sup> یک‌سری بازتاب‌های ۲ یا ۳ بعدی هستند که بین سطوح لرزه‌ای<sup>۲</sup> قرار گرفته‌اند و بازتاب‌های این رخساره‌ها از نظر شکل، دامنه و پیوستگی بازتاب‌ها، فرکانس و سرعت درونی متمایز از رخساره‌های مجاور می‌باشد [Neal., 2004].

پیشگامان اولیه چینه شناسی رادار از رویکردها و مفروضات چینه شناسی لرزه‌ای برای تفسیر مقاطع GPR استفاده کرده‌اند. از جمله این مفروضات می‌توان به لایه‌بندی موازی بازتاب‌ها اشاره کرد. بسیاری از مطالعات اخیر صحت چنین فرضی را تأیید می‌کند. از این رو سطوح رادار، بسته‌های رادار<sup>۳</sup> و رخساره‌های رادار به‌طور معادل با چینه شناسی لرزه‌ای برای چینه شناسی رادار نیز تعریف می‌شود. هر چند بسیاری از اصطلاحات وابسته به چینه شناسی لرزه‌ای می‌تواند

---

<sup>۱</sup> Seismic facies

<sup>۲</sup> Seismic surfaces

<sup>۳</sup> Radar package

به طور مستقیم برای تعاریف چینه شناسی رادار به کار رود، اما در برخی موارد مخصوصاً شرایطی که احتیاج به توصیف رخساره‌ها وجود دارد، احتیاج به پاره‌ای تغییرات جزئی بر این اصطلاحات وجود دارد. اما در نهایت توصیه می‌شود که رخساره‌های رادار با توجه به ویژگی بازتاب‌ها از قبیل شکل، شیب، ارتباط بین بازتاب‌ها و پیوستگی آن‌ها توصیف شوند [Neal., 2004].

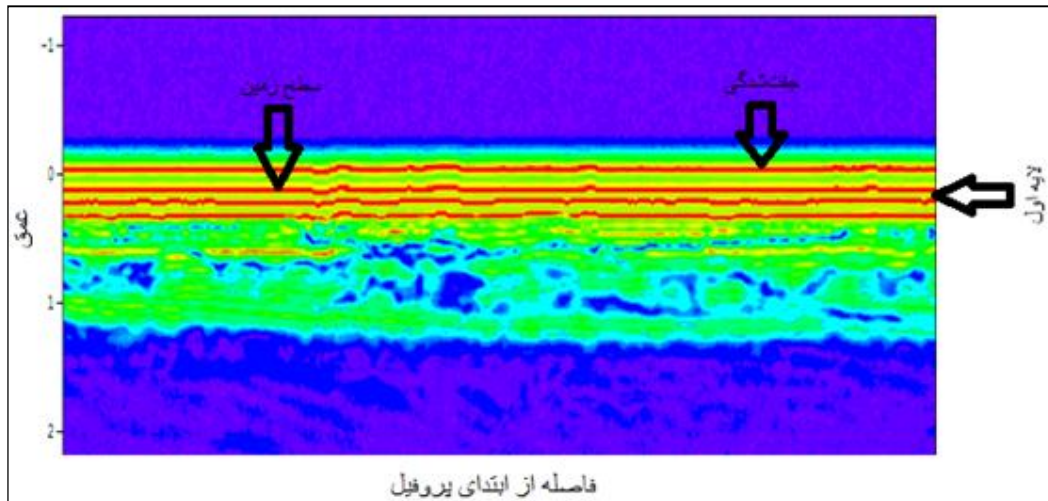
سطوح مرزی در مقاطع رادار فرم بیرونی رخساره‌های رسوبی را نشان می‌دهند و رابطه بین این رخساره‌ها برای تفسیر مراحل رسوب گذاری بنیادی و اساسی است. رابطه بین رخساره‌های رادار، اساس آنالیز رخساره‌ها و مرز بین آن‌ها ما را در تفسیر اجزاء ساختمانی مجاز می‌دارد.

#### ۴-۲- پردازش داده‌های GPR

داده های GPR در این مطالعه توسط نرم افزار Win\_Ekko\_Pro پردازش شده و خروجی آن‌ها به وسیله نرم افزار Transform (که در پیوست الف به اختصار توضیح داده شده) به نمایش درآمده است. در پردازش داده‌های خام در ابتدا از پردازش Dewow برای همه پروفیل‌ها و سپس با توجه به هدفی که در استفاده از بهره‌ها داشتیم از بهره Autogain و یا AGC استفاده کردیم و در مواردی که نشان دادن توالی لایه‌های رسوبی مورد نظر ما بود از پردازش Envelope نیز استفاده کردیم.

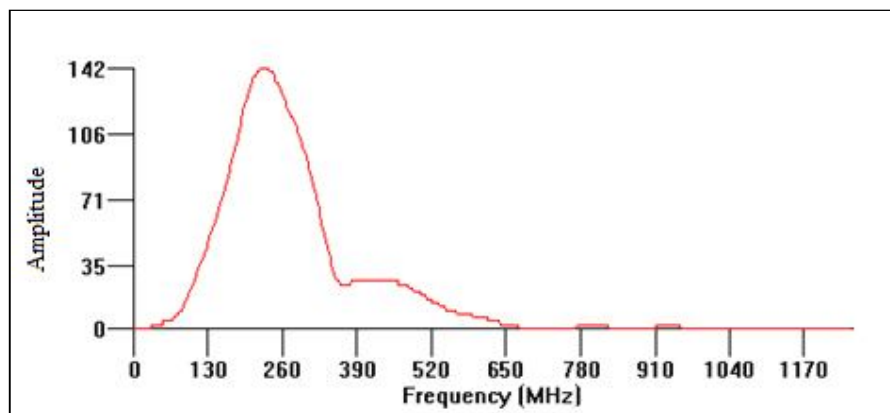
در مطالعات رسوب شناسی اغلب استفاده از بهره AGC توصیه می‌شود ولی در مواردی نیز این بهره تصویر ما را دچار بدنمایی می‌کند که در مورد اکثر پروفیل‌های ما این اتفاق می‌افتاد و کیفیت تصویر بطور قابل ملاحظه‌ای پایین می‌آمد و در این موارد ما ترجیح دادیم که از بهره Autogain استفاده کنیم. در مقطعی که لایه بندی‌ها نشان داده شده‌اند، همان‌طور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است اولین خط مربوط به جفت‌شدگی فرستنده و گیرنده و دومین خط نیز نشان دهنده سطح زمین می‌باشد و در واقع مرز بین لایه‌های رسوبی از خط سوم شروع می‌شود. به این معنی که فاصله بین خط دوم و سوم ضخامت لایه اول و فاصله بین خط سوم و چهارم

ضخامت لایه دوم می‌باشد و همین‌طور تا آخر. در این پروفیل‌ها محور عمودی نشان‌دهنده عمق و محور افقی نشان‌دهنده فاصله از ابتدای پروفیل می‌باشد.



شکل ۴-۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

بدلیل رسانندگی بالای محیط برداشت، همان‌طور که در مقاطع دیده می‌شود عمق نفوذ بسیار پایین می‌باشد که در مواردی که رسوبات، ریز دانه است، این مسئله نیز مزید بر علت می‌شود. با رسم طیف فرکانسی که نمونه‌ای از آن در شکل ۴-۲ آورده شده است مشاهده می‌شود که فرکانس مرکزی (فرکانس مرکزی فرکانسی است که در آن بیشترین انرژی سیگنال متمرکز است) از ۲۵۰ به مقادیری در محدوده ۲۲۰ تا ۲۳۰ رسیده است که این موضوع نیز نشان‌دهنده اتلاف فرکانس‌های بالا به دلیل رسانندگی بسیار بالای زمین می‌باشد. در این شکل محور افقی نشان‌دهنده فرکانس و محور عمودی نشان‌دهنده دامنه سیگنال می‌باشد. مابقی طیف‌های فرکانسی به دلیل مشابهت‌های آن‌ها و پرهیز از تکرار بی‌مورد در پیوست (ب) آورده شده‌اند. به دلیل نقص فنی دستگاه، از میان پروفیل‌های برداشت شده، پروفیل‌های ۲، ۲۶، ۲۷ و ۲۸ دچار اعوجاج بسیار زیادی شده بودند، به‌طوری‌که قابل بحث نبودند و در فایل داده‌های پروفیل‌های ۱۱ و ۱۶ و ۳۱ و ۳۲ نیز داده‌ای ثبت نشده بود.



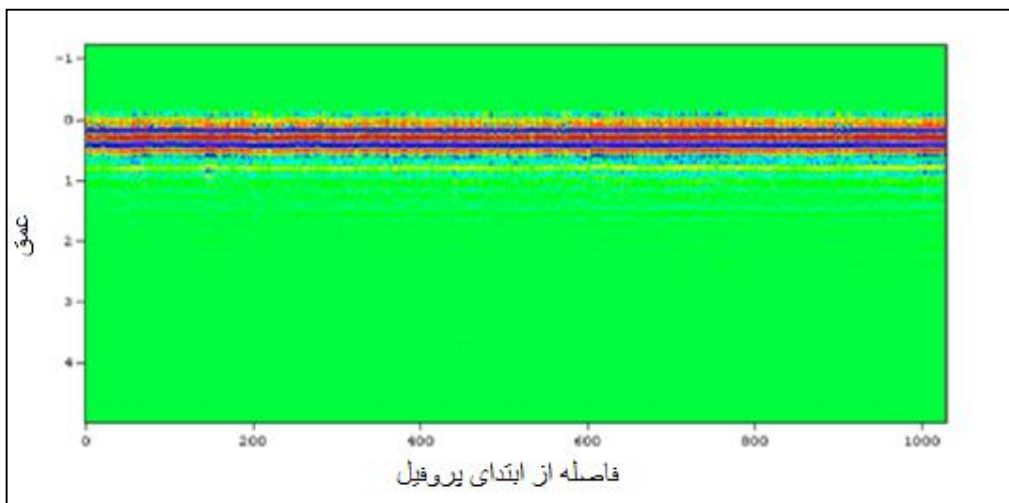
شکل ۴-۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۰

### ۴-۳- مقاطع عمقی و طیف فرکانسی پروفیل‌ها به همراه تفسیر آن‌ها

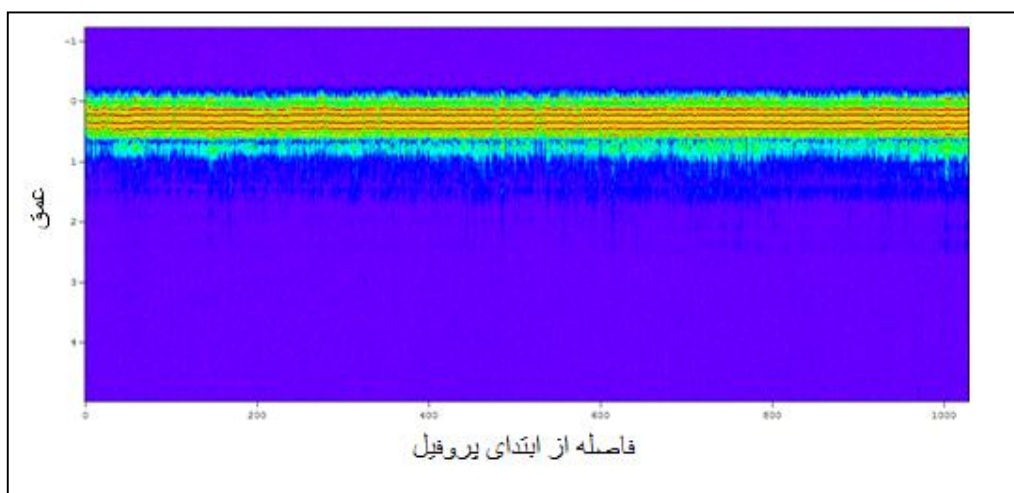
مقاطع عمقی و طیف فرکانسی پروفیل‌ها به همراه تفسیر مختصری در مورد این پروفیل‌ها در ادامه آورده شده است.

#### ۱- پروفیل ۱:

در شکل‌های ۴-۳ و ۴-۴ مقاطع عمقی پروفیل شماره ۱ رسم شده‌اند. در این پروفیل چهار لایه موازی که ضخامت تقریبی آن‌ها از بالا به ترتیب ۱۰، ۱۷، ۱۲ و ۱۲ سانتی‌متر است به چشم می‌خورد که مرز پایینی لایه چهارم به سختی قابل تشخیص است. با ملاحظه طیف فرکانسی دیده می‌شود که فرکانس مرکزی به مقداری بین ۲۱۰ تا ۲۱۵ مگاهرتز تنزل کرده است که این مسئله به دلیل فیلتر شدن بیشتر سیگنال‌های فرکانس بالاست.



شکل ۳-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain

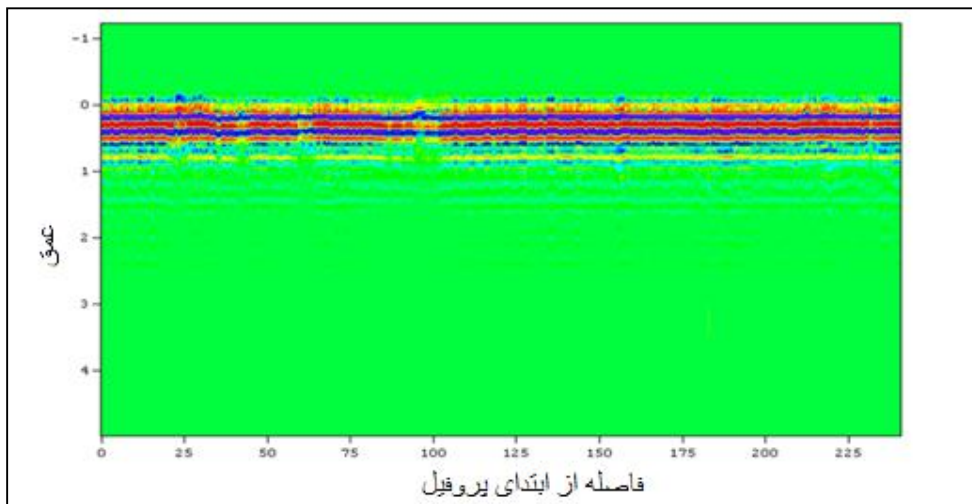


شکل ۴-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

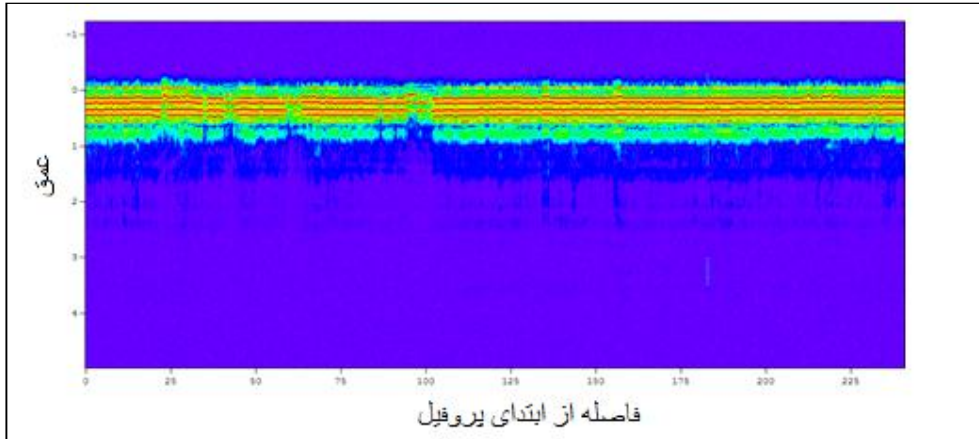
همان‌طور که قبلاً اشاره شد پروفیل شماره ۲ به دلیل نقص فنی دستگاه اعوجاج بسیاری داشته و قابل بحث نبود به همین دلیل در اینجا آورده نشده است. پروفیل‌های ۲۶، ۲۷ و ۲۸ نیز به همین دلیل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

### ۳- پروفیل ۳

در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ مقاطع عمقی پروفیل شماره ۳ رسم شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۴-۶ دیده می‌شود در این پروفیل، چهار لایه موازی که ضخامت تقریبی آن‌ها از بالا به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۱۲ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد، به چشم می‌خورد. که در این پروفیل نیز مرز پایینی لایه چهارم به سختی قابل تشخیص است. در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود که در فاصله ۹۰ تا ۱۰۰ متری از پروفیل یک کاهش ناگهانی عمق نفوذ به چشم می‌خورد که ممکن است به دلیل کاهش ناگهانی اندازه رسوبات و افزایش میزان رس در این منطقه باشد. فرکانس مرکزی در طیف فرکانسی این پروفیل از مقدار ۲۵۰ به مقداری بین ۲۱۰ تا ۲۱۵ تنزل کرده است که نشان دهنده رسانندگی بالا در این محل و اتلاف بیشتر سیگنال‌های فرکانس بالا در این محل می‌باشد.



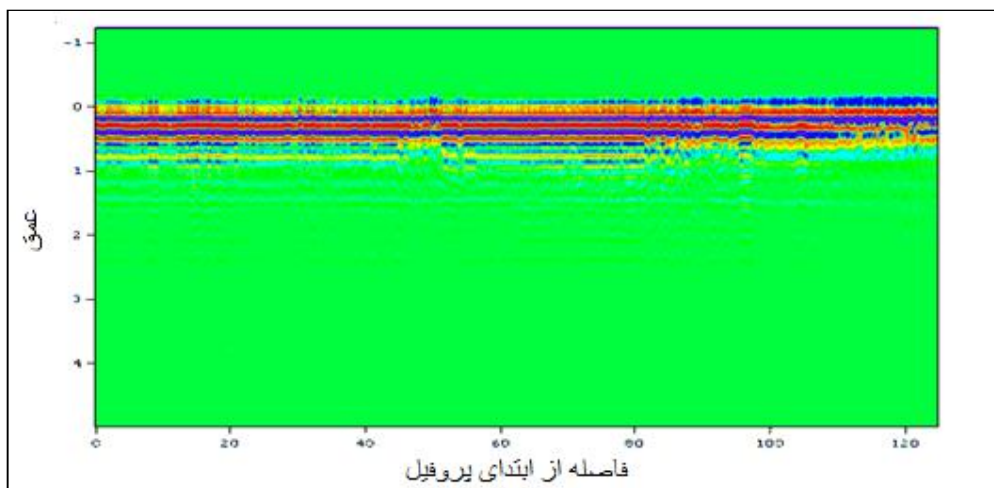
شکل ۴-۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



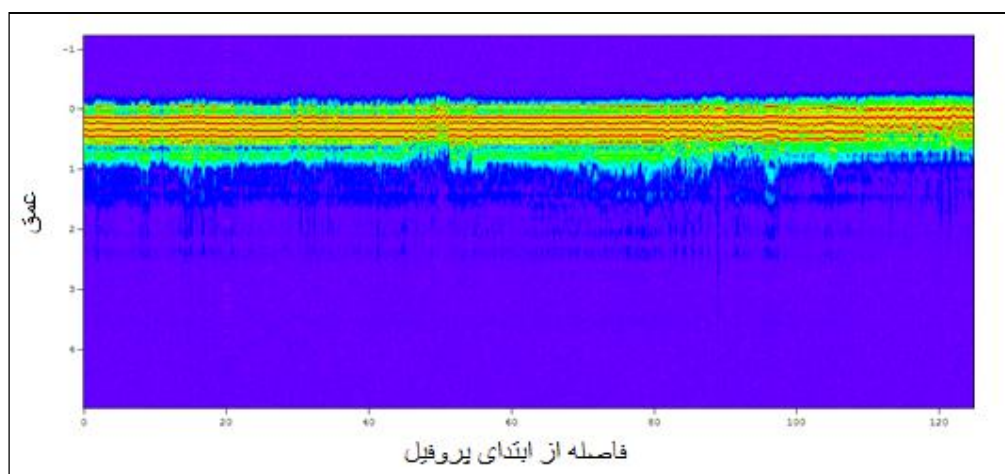
شکل ۴-۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

#### ۴- پروفیل ۴

در این پروفیل همان‌طور که در شکل ۴-۸ نیز مقطع عمقی این پروفیل نشان می‌دهد، چهار لایه موازی که ضخامت‌شان به ترتیب از بالا ۱۵، ۱۰، ۱۰ و ۱۲ می‌باشد به چشم می‌خورد. با نگاهی به شکل ۴-۷ که مقطع عمقی دو بعدی این پروفیل می‌باشد یک کاهش عمق نفوذ در انتهای این پروفیل به چشم می‌خورد به طوری که لایه‌های ۲ و ۳ و ۴ در این منطقه قابل رویت نیستند. این کاهش عمق نفوذ به دلیل افزایش میزان رسانندگی می‌باشد و چون میزان رطوبت در طول پروفیل به دلیل موازی بودن پروفیل با ساحل تقریباً ثابت است، این افزایش میزان رسانندگی احتمالاً به دلیل کاهش اندازه ذرات و افزایش میزان رس می‌باشد. در این پروفیل نیز فرکانس مرکزی به مقداری بین ۲۲۰ تا ۲۲۵ تنزل پیدا کرده است.



شکل ۴-۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



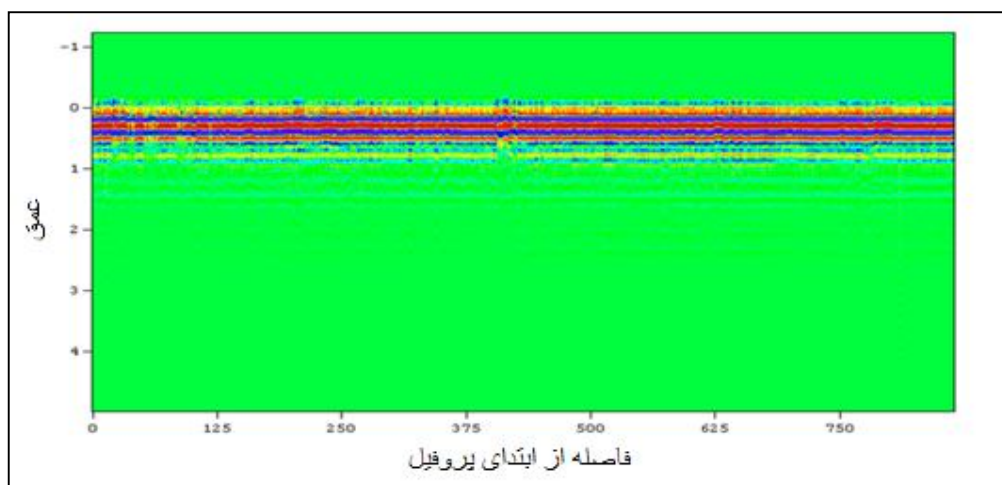
شکل ۴-۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

#### ۵- پروفیل ۵

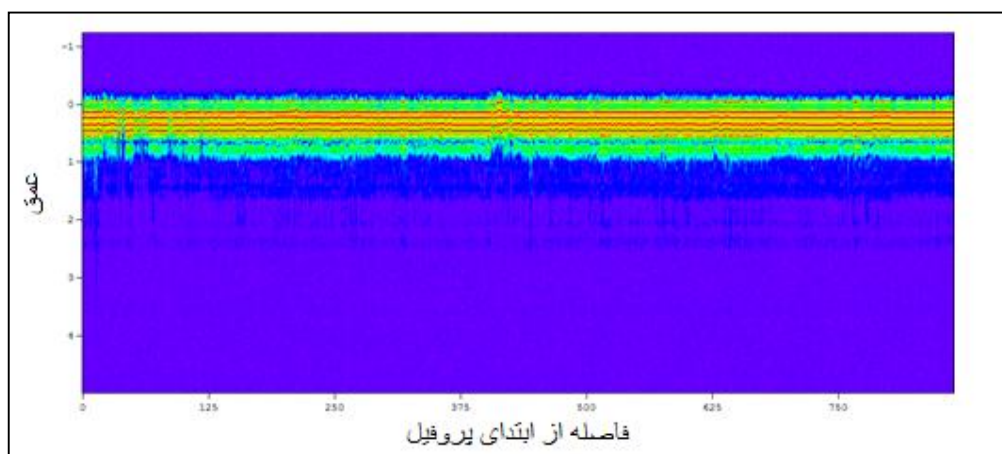
شکل ۴-۹ و ۴-۱۰ مقطع عمقی این پروفیل را نشان می‌دهند. در این پروفیل، چهار لایه موازی که ضخامت‌شان از سطح به ترتیب ۱۰، ۱۴، ۱۲ و ۱۳ سانتی‌متر می‌باشد، دیده می‌شود و در طول این پروفیل اعوجاجی در این لایه‌ها و ضخامت‌شان دیده نمی‌شود. در این پروفیل نیز عمق نفوذ پایین به دلیل رسانندگی بسیار بالای محل برداشت می‌باشد که این موضوع به خوبی با



مشاهده طیف فرکانسی قابل رؤیت می باشد زیرا در این پروفیل نیز فرکانس مرکزی از مقدار ۲۵۰ مگاهرتز به مقداری در حدود ۲۲۰ رسیده است.



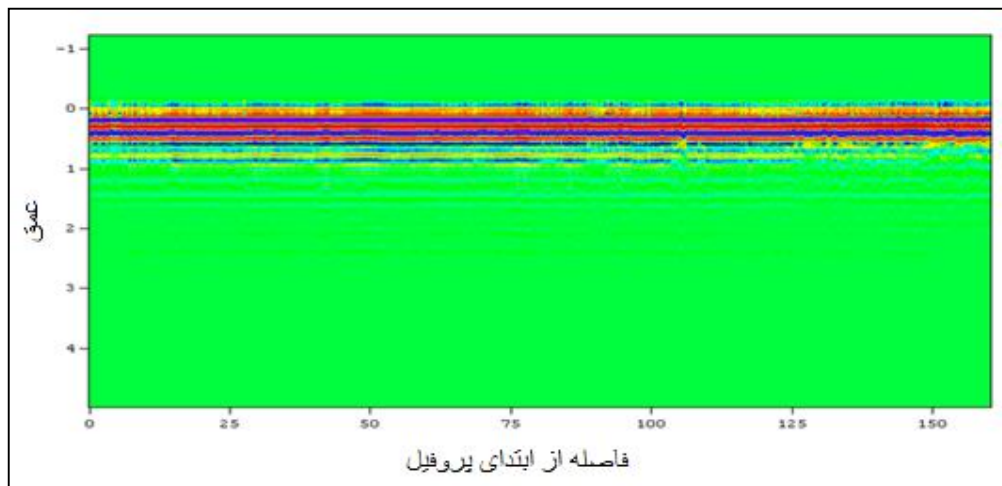
شکل ۴-۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۵ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



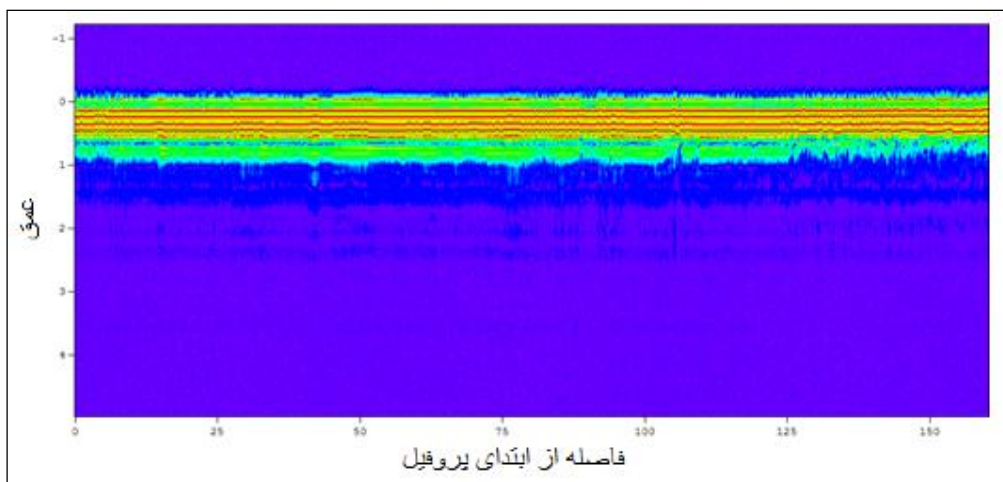
شکل ۴-۱۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۵ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope.

## ۶- پروفیل ۶

در پروفیل ۶، با بررسی شکل‌های ۱۱-۴ و ۱۲-۴ که مقاطع عمقی دو بعدی این پروفیل هستند می‌بینیم که چهار لایه موازی که ضخامت‌شان از سطح به ترتیب ۱۰، ۱۴، ۱۰ و ۱۲ می‌باشد وجود دارد که مرز پایینی لایه آخر به سختی قابل تشخیص است و در طول این پروفیل نیز اعوجاجی در لایه‌ها دیده نمی‌شود، اما با نگاهی دقیق به مقاطع عمقی این پروفیل، کاهش عمق نفوذ هر چه به سمت انتهای پروفیل می‌رویم مشهود است. مشاهده طیف فرکانسی در این پروفیل نیز مؤید رسانندگی بسیار بالا در محل برداشت می‌باشد. فرکانس مرکزی در این پروفیل در حدود ۲۳۰ مگاهرتز می‌باشد.



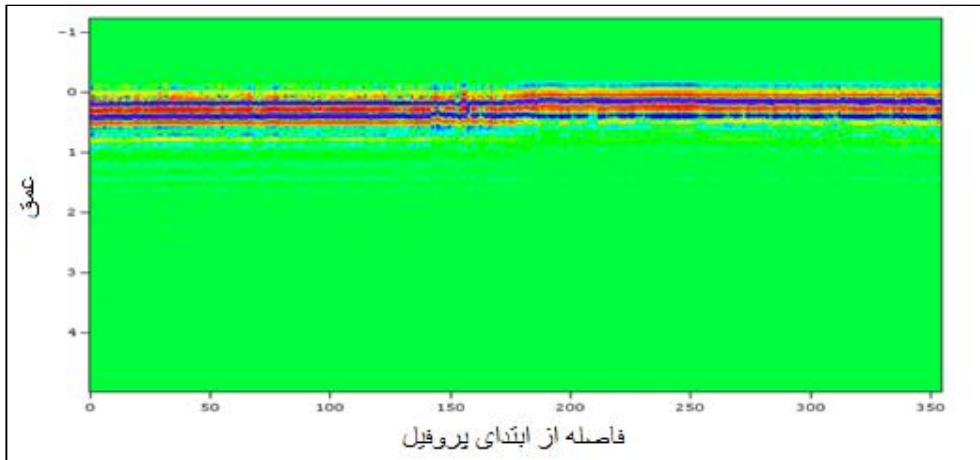
شکل ۱۱-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۶ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



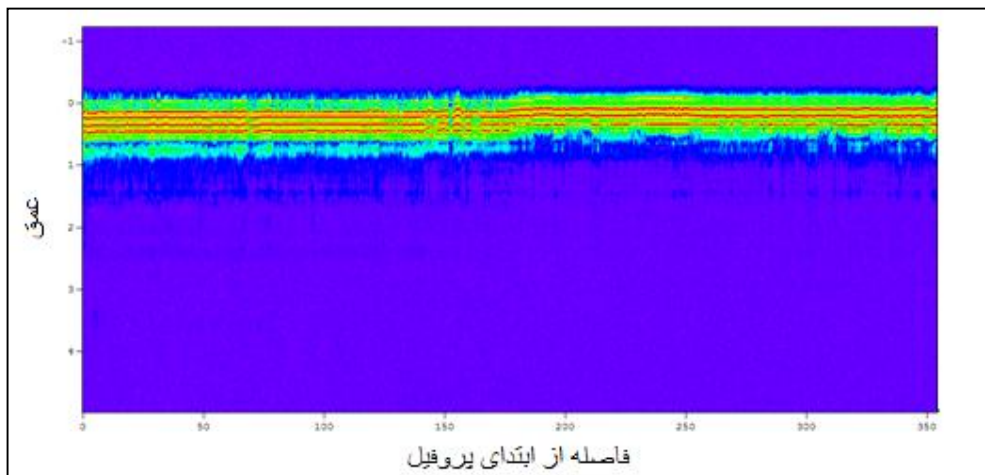
شکل ۴-۱۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۶ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

#### ۷- پروفیل ۷

مقاطع عمقی پروفیل شماره ۷ در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ ترسیم شده‌اند. بررسی این مقاطع نشان می‌دهند که سه لایه موازی که ضخامت‌شان ۱۵، ۱۰ و ۱۳ می‌باشد، در محدوده‌ای که این پروفیل برداشت شده است وجود دارد که البته از فاصله ۱۸۰ متری از ابتدای پروفیل لایه سوم محو شده و از این فاصله به بعد تنها دو لایه قابل تشخیص است. که به احتمال فراوان این موضوع به دلیل کاهش ابعاد ذرات و افزایش میزان رس و به دنبال آن افزایش میزان رسانندگی می‌باشد. به دلیل موازی بودن با ساحل نمی‌توان این افزایش میزان رسانندگی را به افزایش میزان رطوبت نسبت داد و در واقع میزان رطوبت در طول پروفیل تقریباً ثابت است.



شکل ۴-۱۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۷ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.

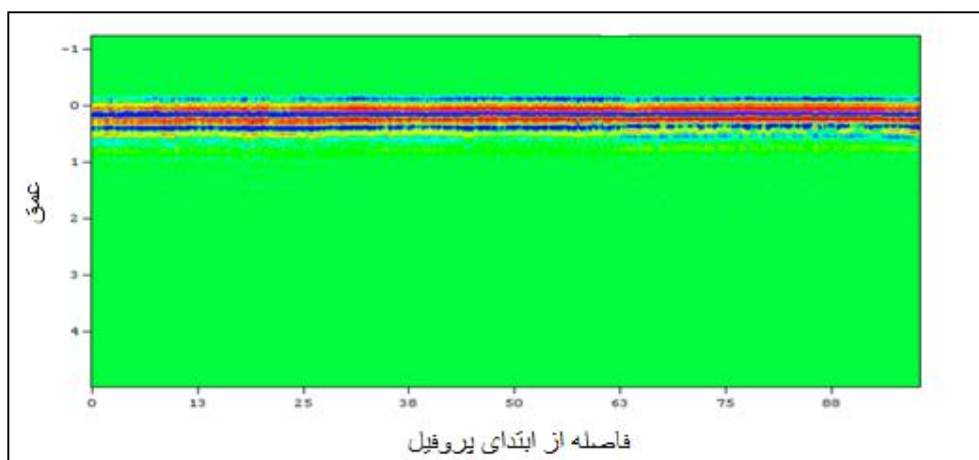


شکل ۴-۱۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۷ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope.

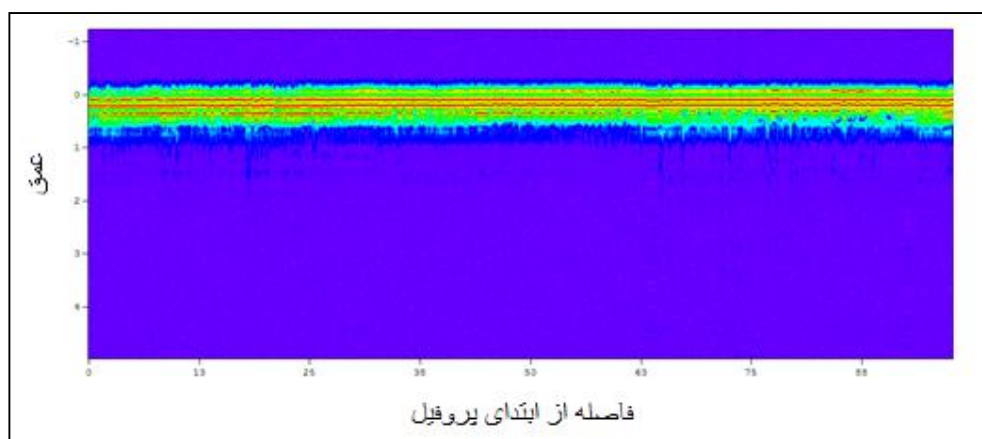
#### ۸- پروفیل ۸:

در این پروفیل همان‌طور که از مقاطع عمقی این پروفیل که در شکل‌های ۴-۱۵ و ۴-۱۶ رسم شده است، دیده می‌شود عمق نفوذ بسیار پایین می‌باشد که این مسئله به دلیل افزایش میزان رسانندگی ناشی از بالا بودن میزان رطوبت، شوری و میزان رس می‌باشد. که این موضوع از روی طیف فرکانسی این پروفیل کاملاً قابل مشاهده است و ملاحظه می‌شود که فرکانس مرکزی در

این پروفیل نیز کاهش چشم‌گیری داشته است. در این پروفیل دو لایه موازی که ضخامت‌شان ۱۲ و ۱۵ سانتیمتر می‌باشد دیده می‌شود و غیر از این دو لایه ساختار دیگری دیده نمی‌شود.



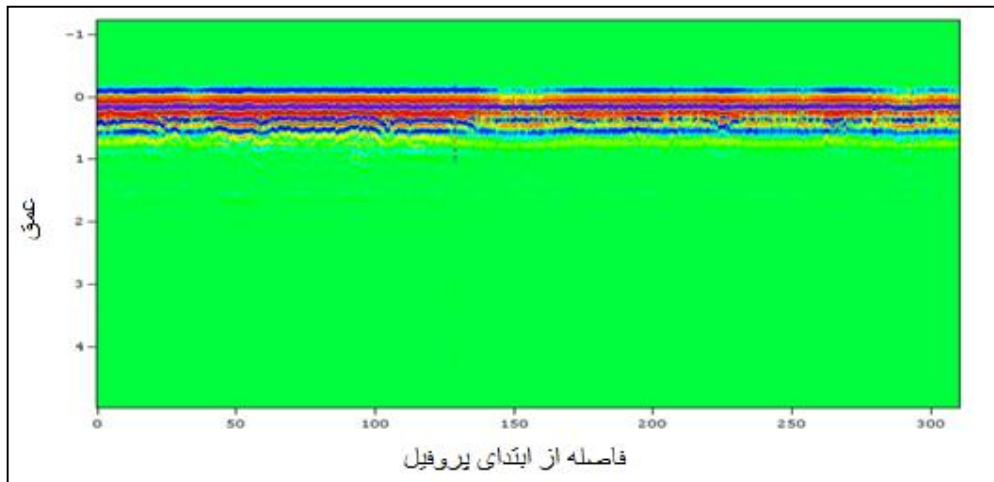
شکل ۴-۱۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۸ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



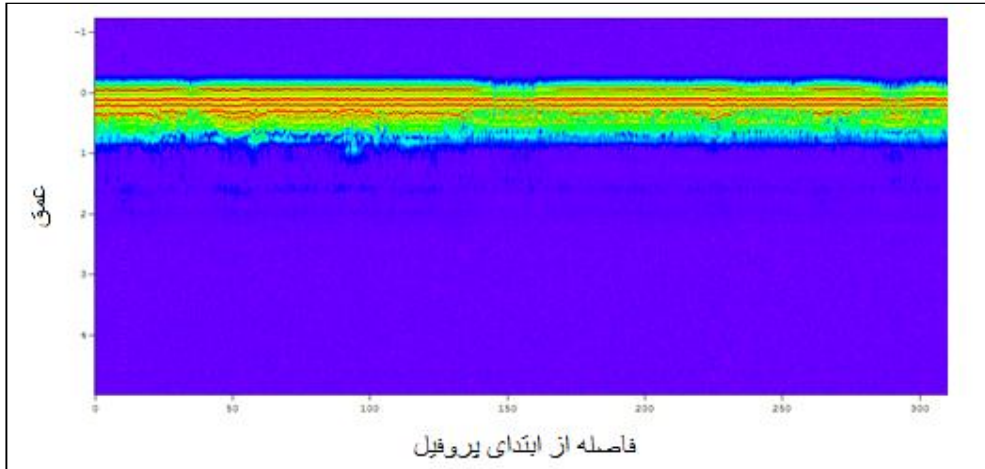
شکل ۴-۱۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۸ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope.

## ۹- پروفیل ۹:

شکل‌های ۱۷-۴ و ۱۸-۴ مقاطع عمقی پروفیل شماره ۹ را نمایش می‌دهند. در این پروفیل سه لایه موازی که ضخامت‌شان از بالا به ترتیب ۱۵، ۱۰ و ۸ سانتی‌متر می‌باشد مشاهده می‌شود، که لایه دوم در طول پروفیل تغییر ضخامت دارد و لایه سوم نیز تنها در ابتدای پروفیل براحتی تشخیص داده می‌شود و از فاصله ۱۳۰ متری از ابتدای پروفیل به بعد این لایه به سختی تشخیص داده می‌شود. به این معنی که هر چه از ابتدای پروفیل به سمت انتهای آن حرکت می‌کنیم عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند. جابجایی پیک طیف فرکانسی در این پروفیل نیز نشان‌دهنده رسانندگی بسیار بالای زمین در محل برداشت می‌باشد.



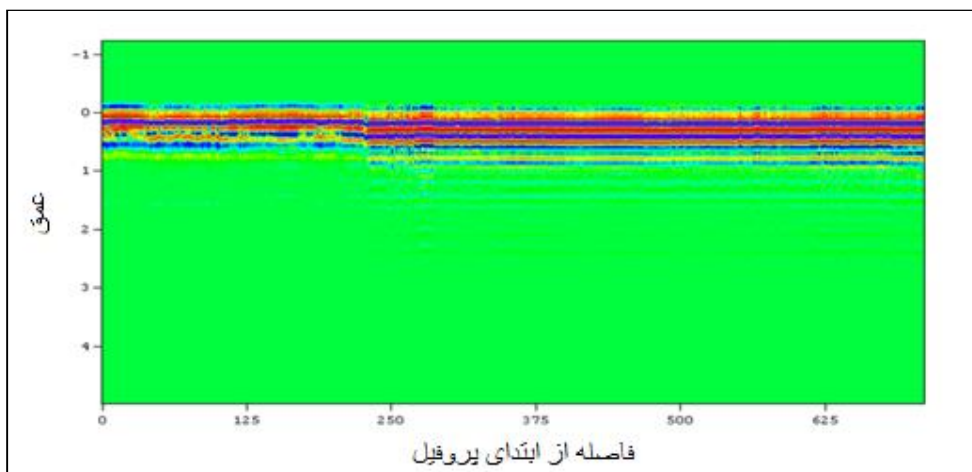
شکل ۱۷-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۹ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



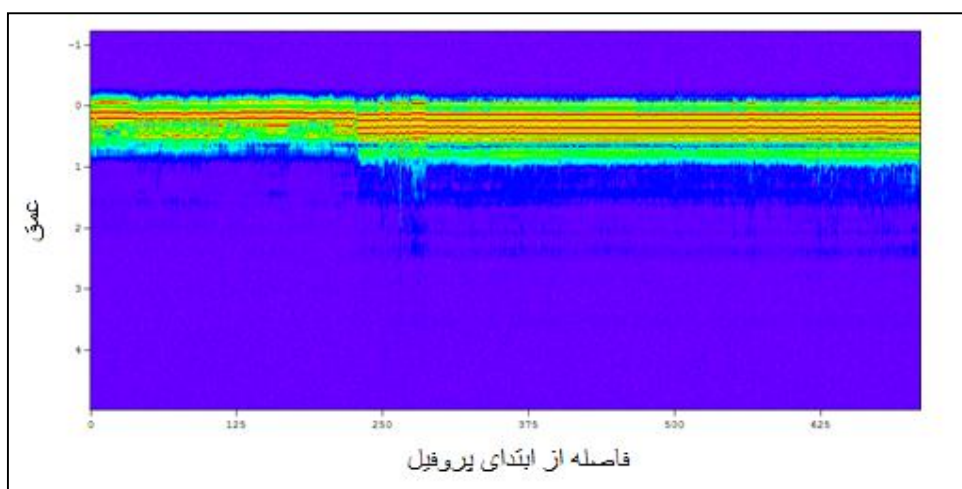
شکل ۴-۱۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۹ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

#### ۱۰- پروفیل ۱۰:

در پروفیل شماره ۱۰ برخلاف پروفیل شماره ۹ که در ابتدای پروفیل عمق نفوذ بیشتر بود، از ابتدای پروفیل تا فاصله ۲۰۰ متری عمق نفوذ بسیار پایین است ولی بعد از آن عمق نفوذ افزایش دارد. با توجه به شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ که مقاطع عمقی دو بعدی این پروفیل هستند ملاحظه می‌شود که در این پروفیل چهار لایه موازی که ضخامت‌شان از سطح به ترتیب ۱۲، ۱۴، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد وجود دارد، که البته در ابتدای این پروفیل تنها لایه اول قابل تشخیص است و همان‌طور که اشاره شد از ابتدای پروفیل تا فاصله ۲۰۰ متری عمق نفوذ بسیار پایین می‌آید که می‌تواند به دلیل کاهش اندازه ذرات و افزایش میزان رس و متعاقباً افزایش رسانندگی در این فاصله باشد که این افزایش رسانندگی را جابجایی پیک طیف فرکانسی نیز تأیید می‌کند.



شکل ۴-۱۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۰ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



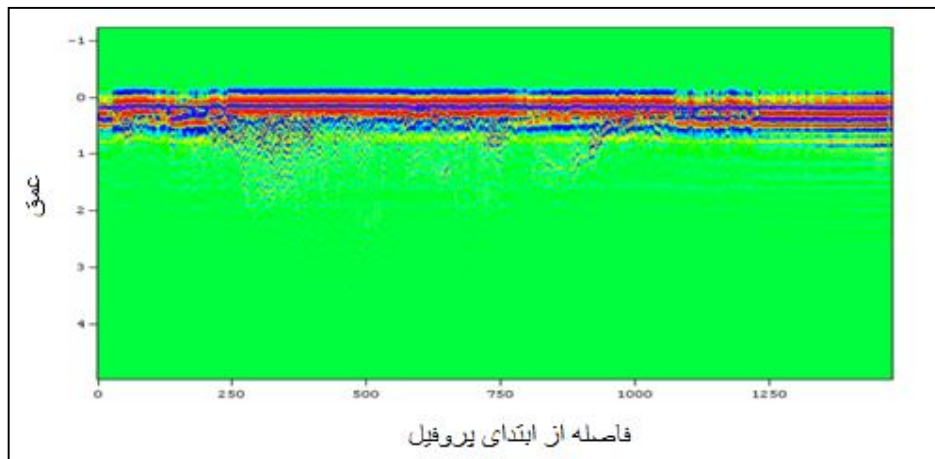
شکل ۴-۲۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۰ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

به طوری که گفته شد به دلیل نقص فنی دستگاه، در فایل داده‌های پروفیل ۱۱ داده‌ای ثبت نشده بود و به همین دلیل بحث در مورد این پروفیل در اینجا آورده نشده است. به پروفیل‌های ۱۶، ۳۱ و ۳۲ نیز به همین دلیل پرداخته نشده است.

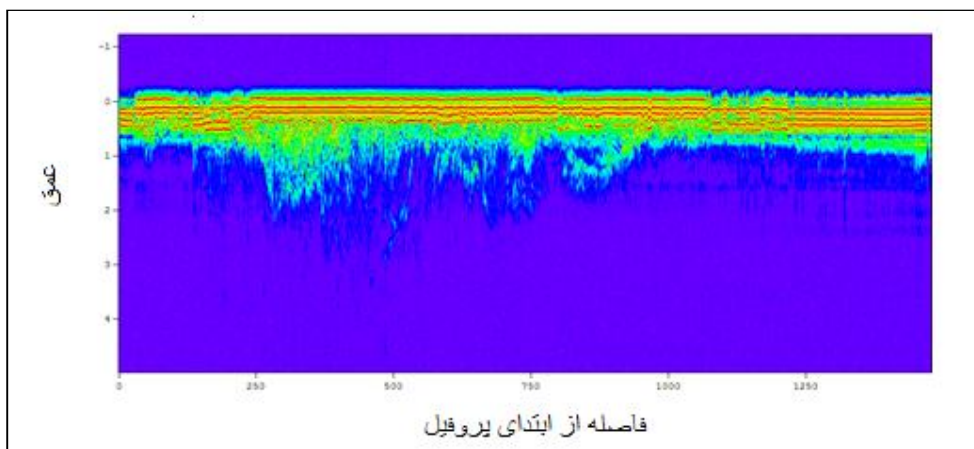


## ۱۲- پروفیل ۱۲:

شکل‌های ۴-۲۱-۴ تا ۲۲-۴ مقاطع عمقی مربوط به پروفیل شماره ۱۲ می‌باشند. در این پروفیل سه لایه که ضخامت متوسط آن‌ها از سطح به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد به چشم می‌آید. خورد که ضخامت‌شان در طول پروفیل تغییر می‌کند. در فاصله ۲۴۰ متری تا ۴۰۰ متری پروفیل و در فاصله ۷۵۰ تا ۹۰۰ متری پروفیل اعوجاجاتی دیده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده وجود یک ساختار رسوبی در زیر لایه‌های سطحی باشد. قابل ذکر است که در فاصله ۲۴۰ متری تا ۹۰۰ متری پروفیل لایه دوم و سوم کاملاً محو می‌شوند. پیک طیف فرکانسی در این پروفیل در محدوده بین ۲۲۰ تا ۲۲۵ مگاهرتز می‌باشد.



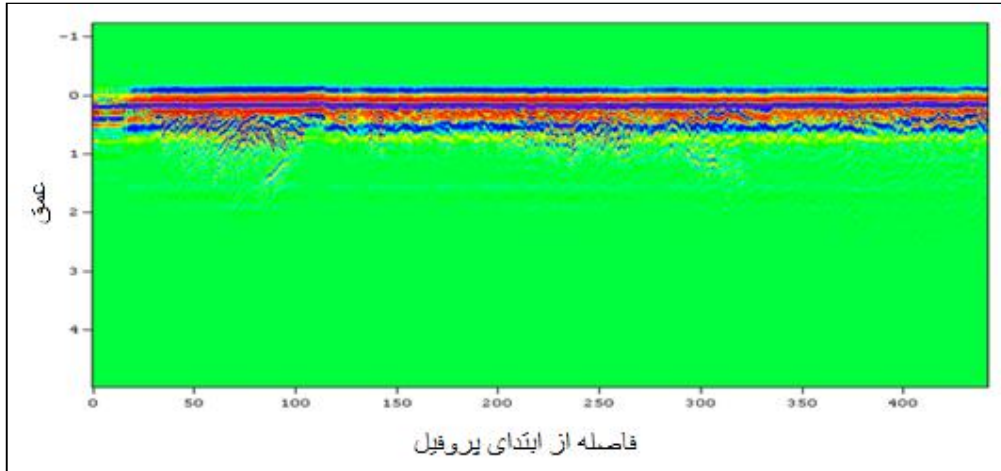
شکل ۴-۲۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۲ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



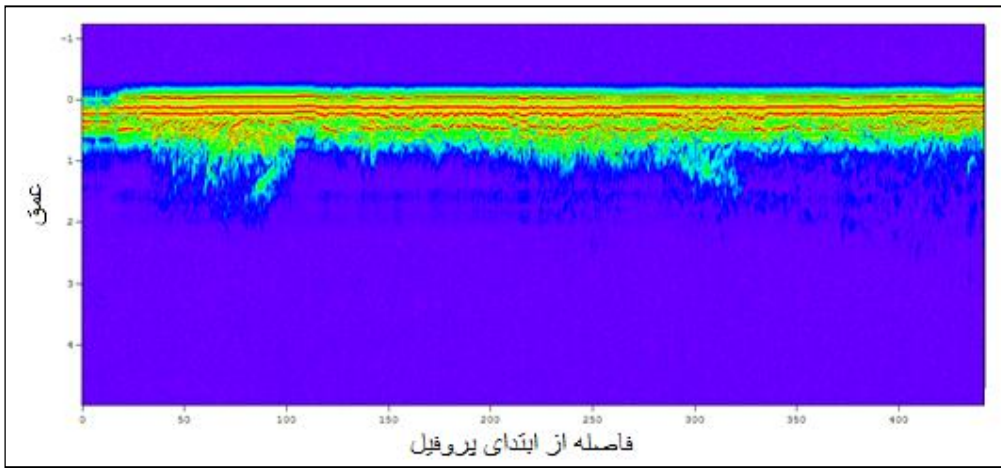
شکل ۴-۲۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۲ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

### ۱۳- پروفیل ۱۳:

در پروفیل شماره ۱۳ نیز ما شاهد حضور یک رخساره رادار در فاصله ۳۰ تا ۱۰۰ متری که نشان‌دهنده حضور یک ساختار رسوبی در این محدوده می‌باشد، هستیم. مقاطع عمقی مربوط به این پروفیل در شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ آورده شده است. در این پروفیل، سه لایه که ضخامت متوسط آن‌ها از بالا به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد، دیده می‌شود که ضخامت‌شان در طول پروفیل تغییر می‌کند. جابجایی پیک طیف فرکانسی در این پروفیل بسیار زیاد است و نشان‌دهنده رسانایی بسیار بالای زمین در این محل می‌باشد.



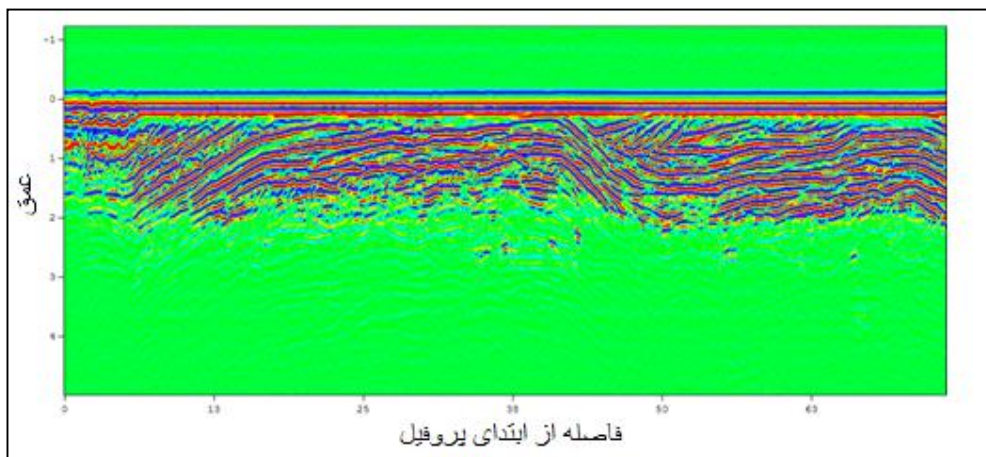
شکل ۴-۲۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



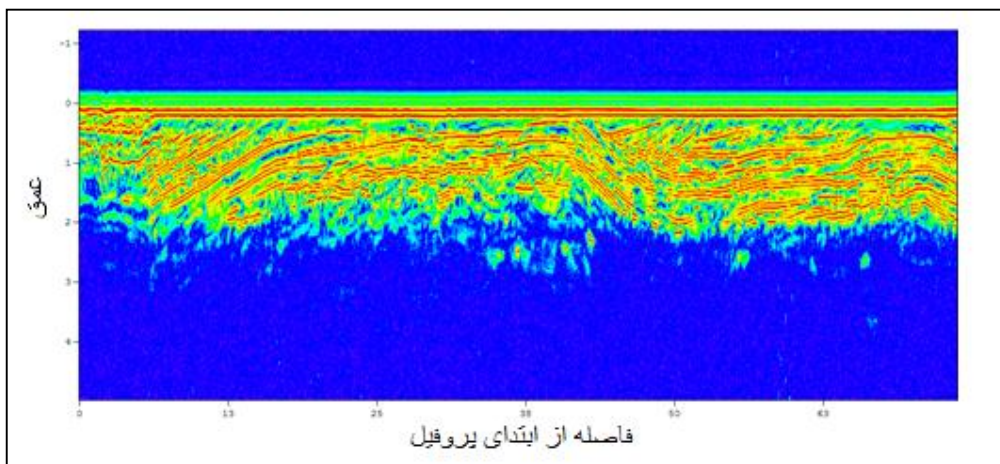
شکل ۴-۲۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

۱۴- پروفیل ۱۴:

این پروفیل که بهترین برداشتاز نظر حضور یک رخساره رادار در آن می‌باشد، بسیار جالب به نظر می‌رسد. در این پروفیل یک لایه که ضخامت متوسط آن ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، در شکل ۴-۲۶ به وضوح مشخص است که ضخامتش در طول پروفیل تغییر می‌کند. در زیر این لایه نازک ۱۰ سانتی‌متری یک رخساره راداری به وضوح دیده می‌شود که نشان دهنده یک ساختار رسوبی در این ناحیه می‌باشد.



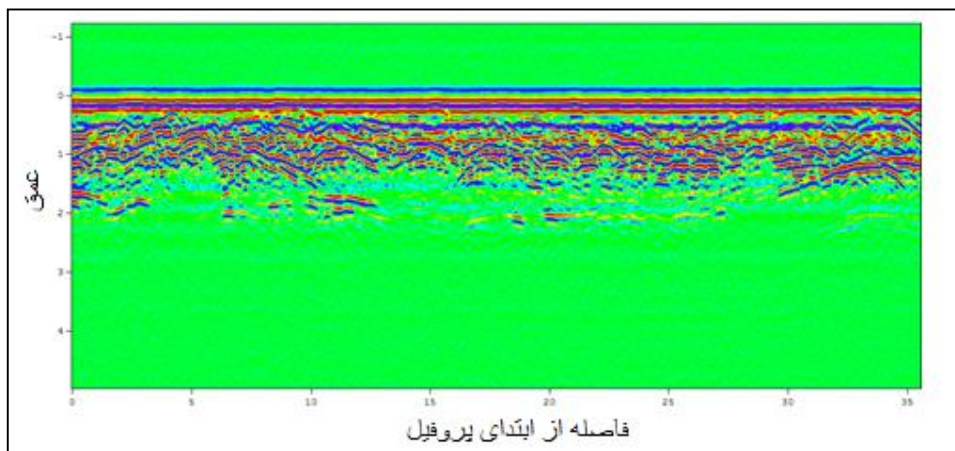
شکل ۴-۲۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC.



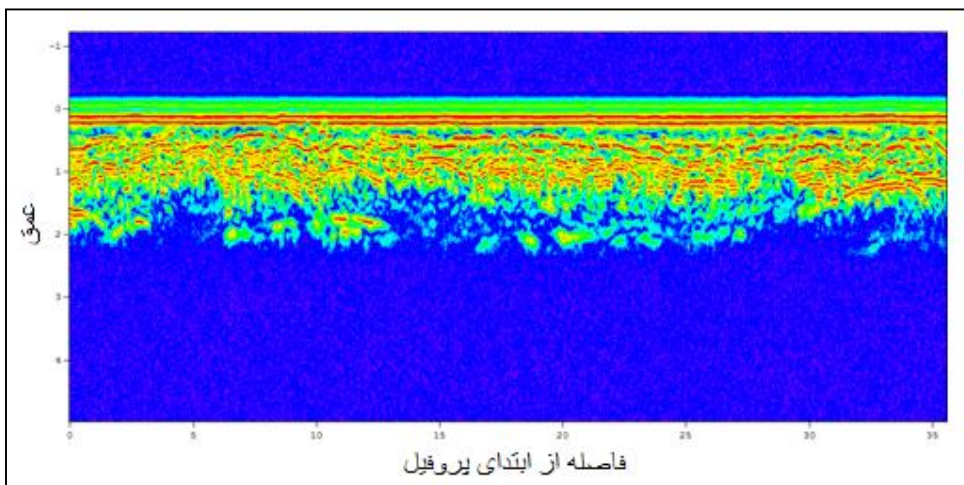
شکل ۴-۲۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope.

۱۵- پروفیل ۱۵:

پروفیل شماره ۱۵ نیز با توجه به شکل‌های ۴-۲۷ و ۴-۲۸ حضور یک ساختار رسوبی را در عمقی کم را نشان می‌دهند. این ساختار رسوبی در زیر یک لایه نازک که ضخامتش در حدود ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد، دیده می‌شود که ضخامتش در طول پروفیل تغییر چندانی نمی‌کند. پیک طیف فرکانسی در این پروفیل در حدود ۲۳۰ مگاهرتز می‌باشد.



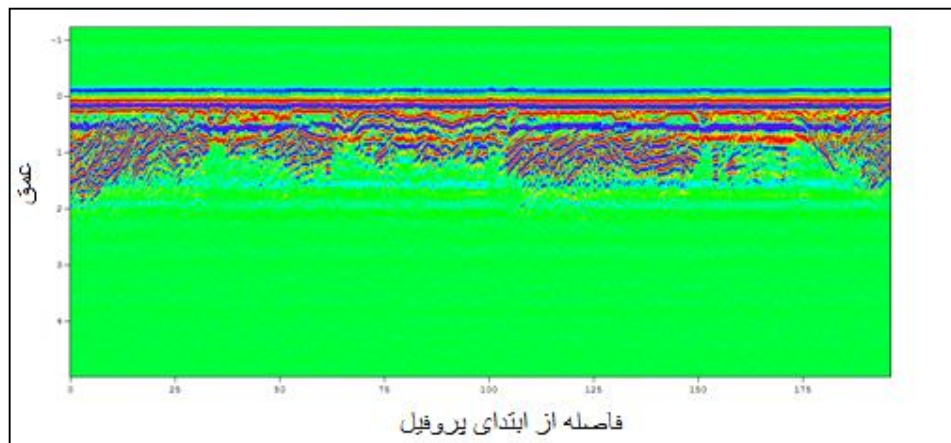
شکل ۴-۲۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۵ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC.



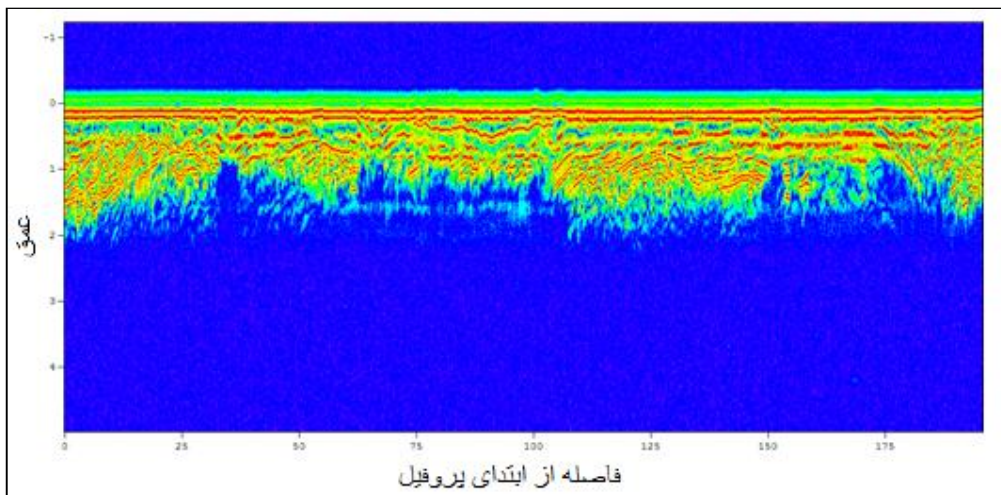
شکل ۴-۲۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۵ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope.

۱۷- پروفیل ۱۷:

ساختارهای رسوبی در پروفیل شماره ۱۷ نیز با اعمال فیلترها و بهره‌های مناسب به زیبایی در شکل‌های ۴-۲۹ و ۴-۳۰ به نمایش درآمده‌اند. این ساختارها در زیر یک لایه که ضخامتش ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد حضور دارند. اگر به شکل ۴-۲۹ با تأمل بیشتری بنگریم می‌بینیم که در فواصل عمق نفوذ کاهش پیدا کرده است و دقیقاً در همین فواصل است که پاسخ ما شدت یافته که این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که کاهش اندازه ابعاد ذرات از سطح به عمق در این فواصل با سرعت بیشتری صورت پذیرفته و زون گذار در این فواصل کوچک بوده و به همین دلیل پاسخی که ما از زمین دریافت کرده‌ایم شدت بیشتری داشته است.



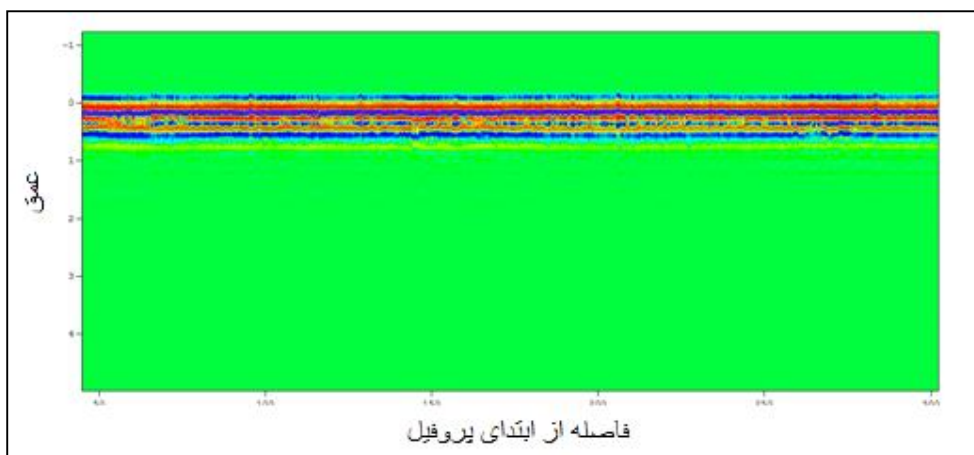
شکل ۴-۲۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۷ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC.



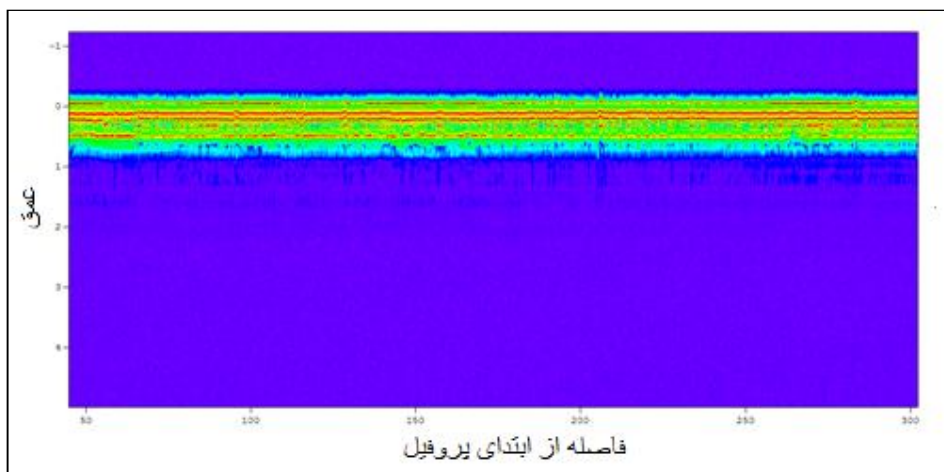
شکل ۴-۳۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۷ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope

#### ۱۸- پروفیل ۱۸:

در پروفیل ۱۸ همان طور که مقاطع عمقی آن در شکل های ۴-۳۱ و ۴-۳۲ نشان می دهند خبری از ساختارهای رسوبی نیست و غیر از دو لایه نازکی که ضخامت شان ۱۲ و ۳۰ سانتی متر بوده و در طول پروفیل تغییر چندانی نمی کنند، پدیده قابل ذکری دیده نمی شود. قابل ذکر است که در ابتدای این پروفیل به دلیل نقص فنی دستگاه داده ها از کیفیت لازم برای بررسی برخوردار نبودند و به همین دلیل از ابتدای پروفیل حذف شدند.



شکل ۴-۳۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۸ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.

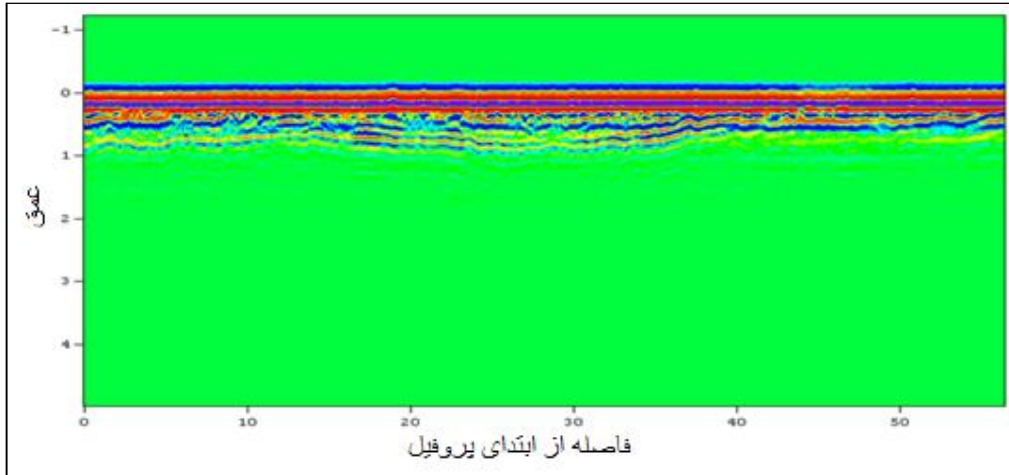


شکل ۴-۳۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۸ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

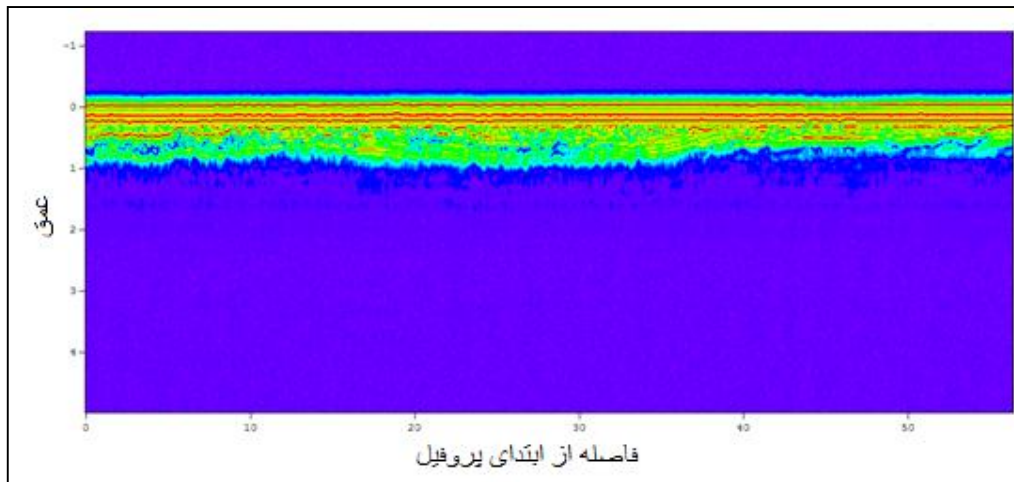
۱۹- پروفیل ۱۹:

رخساره‌های رادار که نماینده حضور یک ساختار در یک نقطه خاص می‌باشند و موضوع مورد علاقه ما در این بحث به حساب می‌آیند در این پروفیل نیز وجود دارند که چگونگی گستردگی این ساختار در زیر یک لایه نازک که ضخامتش ۱۰ سانتی‌متر است، در شکل‌های ۴-۳۳ و ۴-۳۴ نشان داده شده است. به طوری که می‌بینیم در این پروفیل نیز عمق نفوذ بسیار پایین می‌باشد و حتی به ۱ متر هم نمی‌رسد.





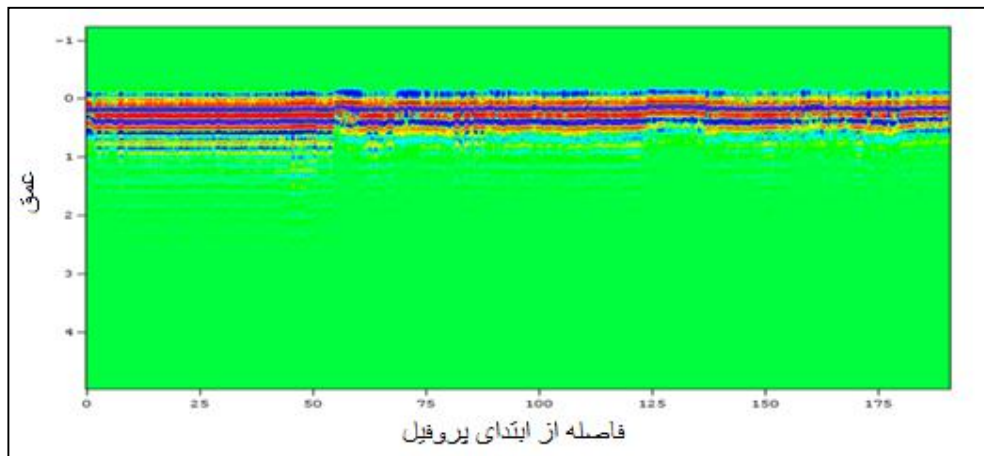
شکل ۳۳-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۹ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



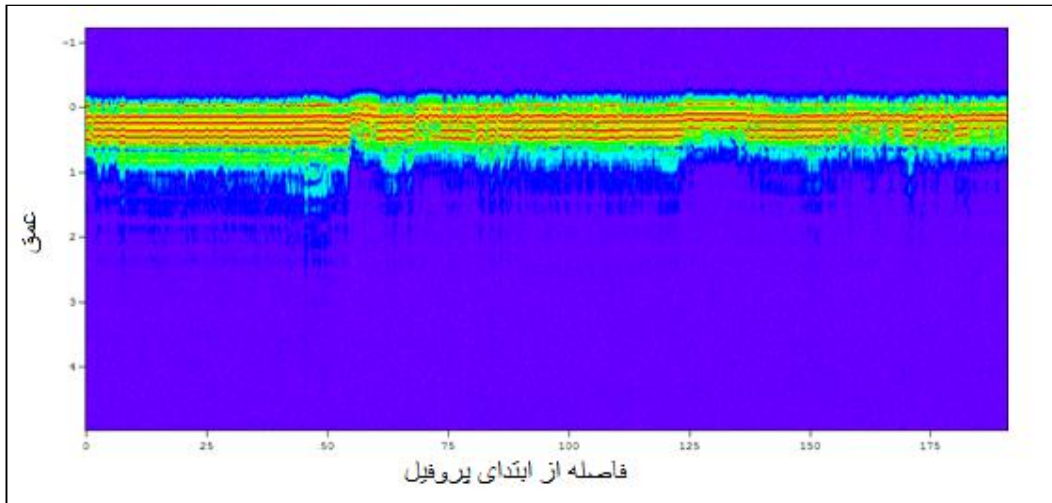
شکل ۳۴-۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۱۹ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope.

۲۰- پروفیل ۲۰:

شکل‌های ۳۵-۴ و ۳۶-۴ مقاطع عمقی دو بعدی پروفیل ۲۰ را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در پروفیل ۲۰، متأسفانه خبری از ساختارهای مورد علاقه ما نیست و تنها سه لایه که ضخامت‌شان به ترتیب از بالا ۱۰، ۱۳ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد دیده می‌شود. البته در ۵۰ متر ابتدای پروفیل لایه چهارمی به ضخامت ۱۲ سانتی‌متر قابل تشخیص است ولی در ادامه با کاهش عمق نفوذ روبرو می‌شویم و لایه چهارم محو می‌شود. این کاهش عمق نفوذ می‌تواند به دلیل ریز دانه شدن رسوبات و افزایش میزان رس در این ناحیه باشد.



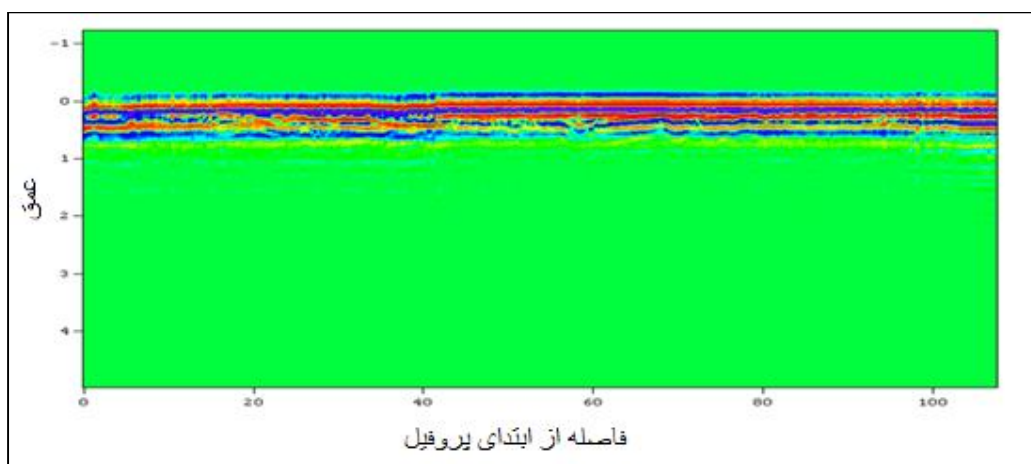
شکل ۴-۳۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۰ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



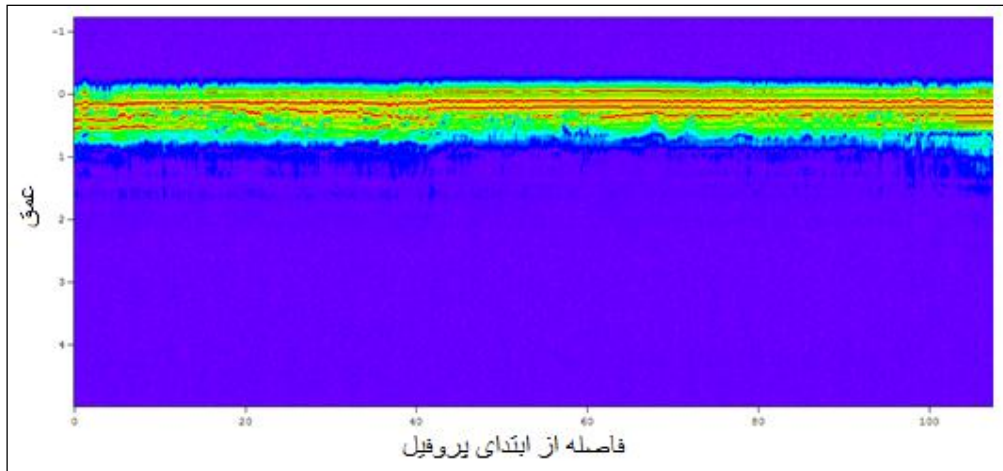
شکل ۴-۳۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۰ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

#### ۲۱- پروفیل ۲۱:

به طوری که در اشکال ۴-۳۷ و ۴-۳۸ می بینیم عمق نفوذ در این پروفیل بسیار پایین است و در این پروفیل تنها دو لایه نازک ۱۰ و ۱۲ سانتی متر قابل تشخیص است، که لایه دوم در انتهای پروفیل واضح تر دیده می شود. در زیر این دو لایه اعوجاجاتی دیده می شود که احتمال حضور یک ساختار رسوبی در این ناحیه را قوت می بخشد. پیک طیف فرکانسی در این پروفیل در حدود ۲۱۰ تا ۲۱۵ مگاهرتز می باشد که نشان از رسانندگی بسیار بالای محل برداشت این پروفیل می باشد.



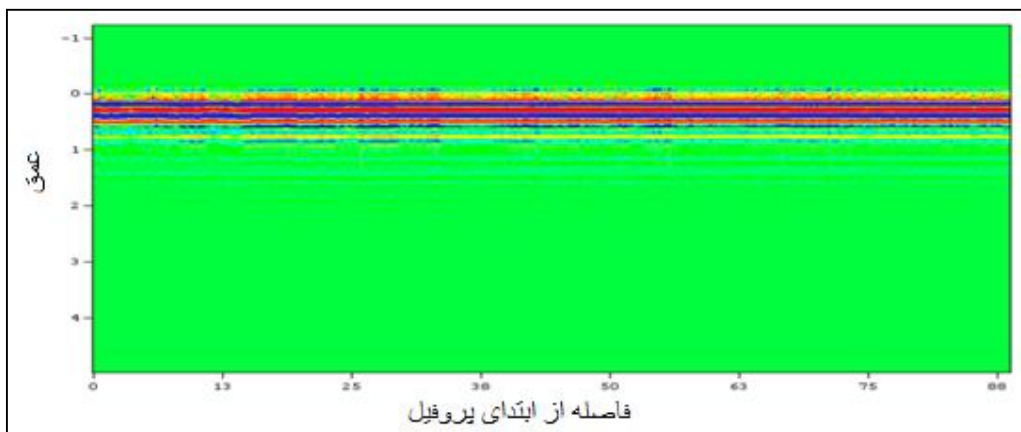
شکل ۴-۳۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۱ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



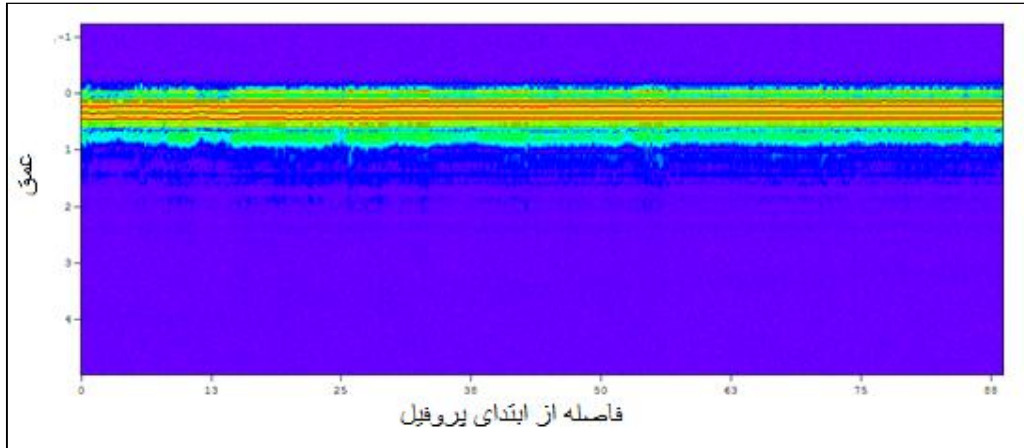
شکل ۴-۳۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۱ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

## ۲۲- پروفیل ۲۲:

شکل‌های ۴-۳۹ و ۴-۴۰ مقاطع عمقی پروفیل ۲۲ را نمایش می‌دهند. به وضوح مشخص است که در این پروفیل نیز ساختاری در محدوده عمق نفوذ GPR وجود نداشته و به همین علت آشکارسازی هم نشده است. این پروفیل تنها شامل چهار لایه تقریباً موازی شامل یک لایه ۱۰ سانتی‌متری در سطح و سه لایه ۱۲ سانتی‌متری در زیر آن می‌باشد. همان‌طور که از مقطع عمقی ملاحظه می‌شود غیر از این ۴ لایه چیز دیگری در این مقطع قابل رؤیت نیست.



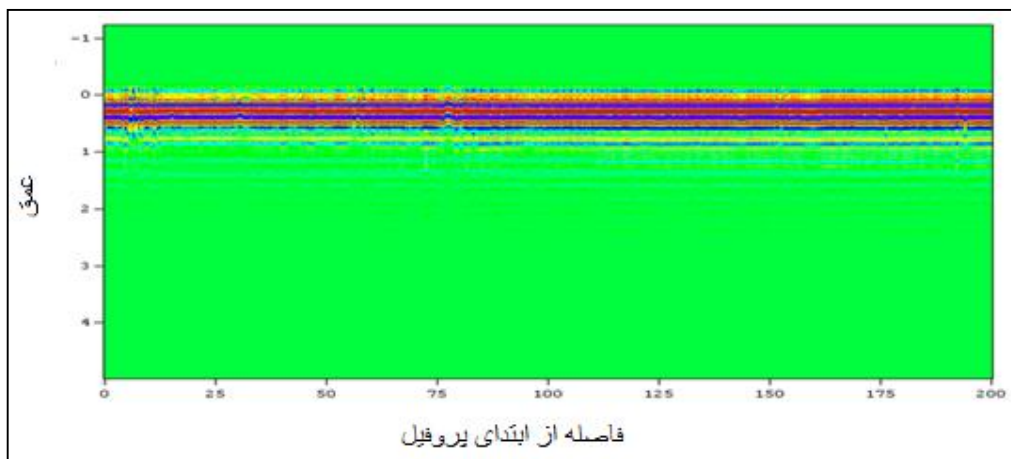
شکل ۴-۳۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۲ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



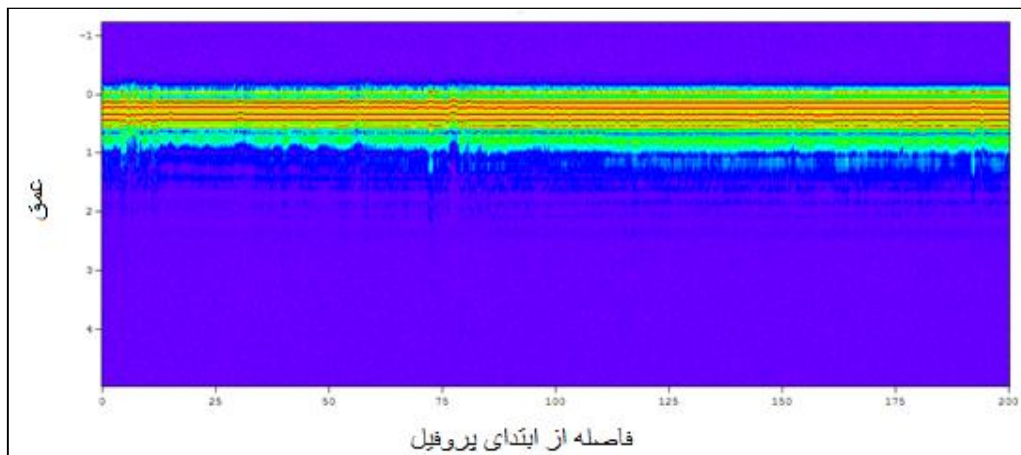
شکل ۴-۴۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۲ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

۲۳- پروفیل ۲۳:

این پروفیل نیز خواسته ما از برداشت در این منطقه را آن طور که باید برآورده نکرد زیرا به-طوری که در شکل های ۴-۴۱ تا ۴-۴۲ می بینیم در این پروفیل نیز رخساره ای به چشم نمی خورد و دوباره با لایه بندی های بسیار نازکی روبرو هستیم. در این پروفیل، چهار لایه تقریباً موازی که ضخامت آن ها ۱۰، ۱۴، ۱۲ و ۱۲ سانتی متر می باشد، دیده می شود که البته مرز پایینی لایه آخر به سختی قابل تشخیص است.



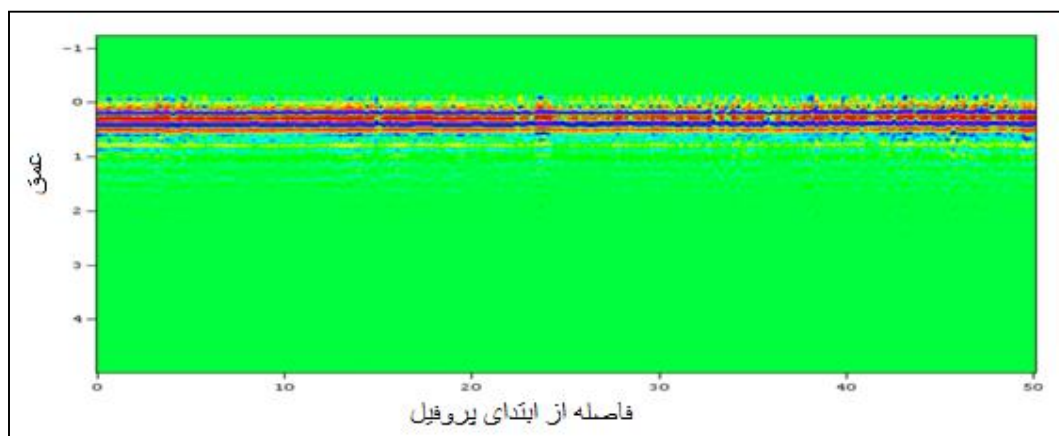
شکل ۴-۴۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



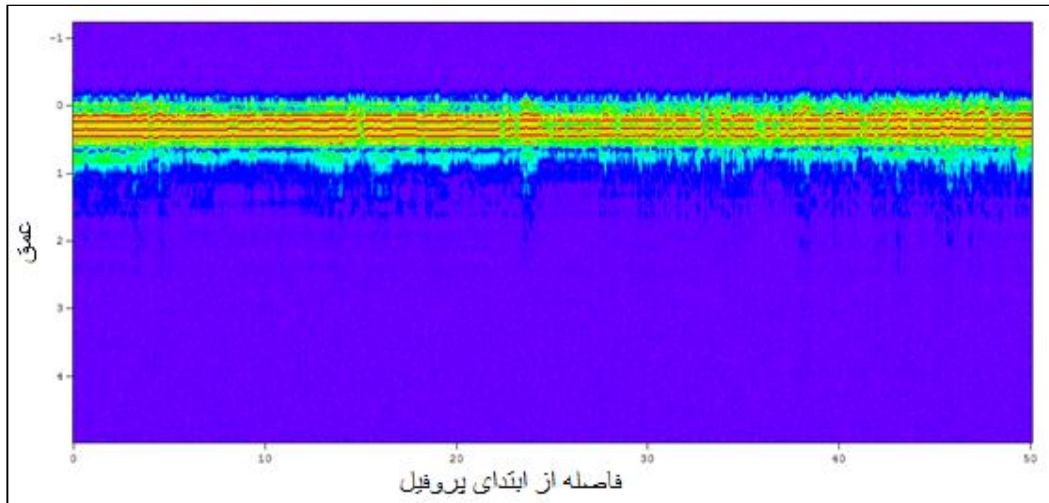
شکل ۴-۴۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

۲۴- پروفیل ۲۴:

اشکال ۴-۴۳ و ۴-۴۴ مقاطع عمقی پروفیل ۲۴ که باز هم نشان از عمق نفوذ پایین دارند، نشان می‌دهند. این پروفیل شامل چهار لایه تقریباً موازی است که ضخامت‌شان به ترتیب از بالا ۱۰، ۱۵، ۱۲ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. البته مرز پایینی لایه آخر به سختی قابل تشخیص است و غیر از این لایه‌ها ساختار خاصی در این پروفیل قابل رؤیت نیست.



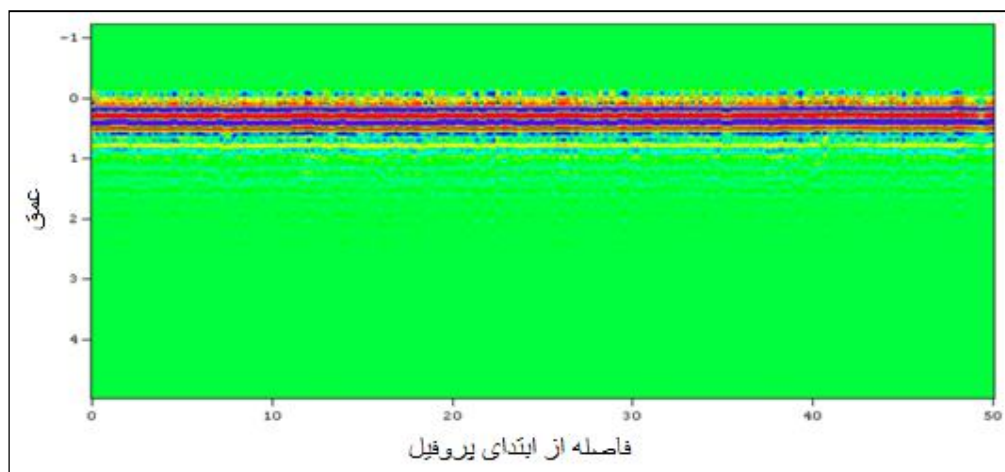
شکل ۴-۴۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



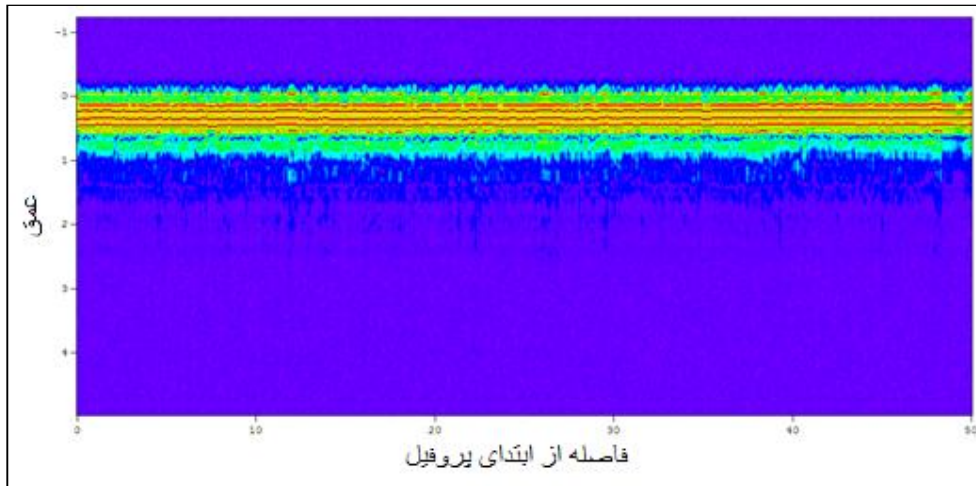
شکل ۴-۴۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

۲۵- پروفیل ۲۵:

پروفیل ۲۵ نیز از حیث حضور رخساره رادار، انتظارات ما را برآورده نکرد و در این پروفیل نیز غیر از چهار لایه تقریباً موازی که ضخامتشان به ترتیب از سطح ۱۰، ۱۴، ۱۲ و ۱۲ سانتی متر می باشد، پدیده دیگری دیده نمی شود، که البته مرز پایینی لایه آخر به سختی قابل تشخیص است.



شکل ۴-۴۵: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۵ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.

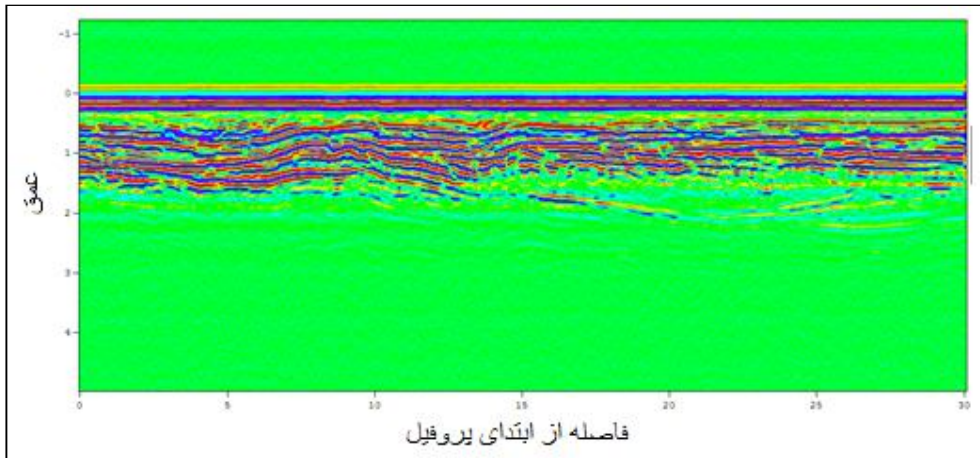


شکل ۴-۴۶: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۵ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

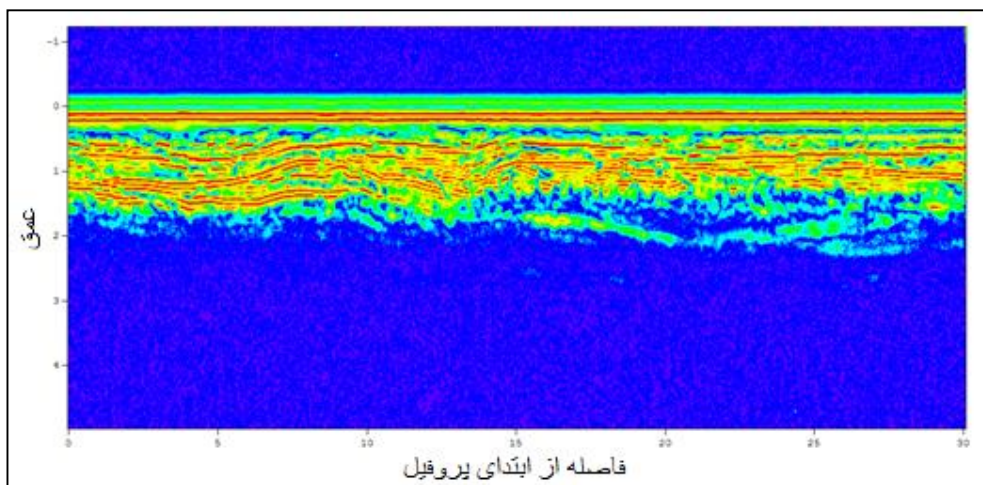
## ۲۹- پروفیل ۲۹:

حضور یک ساختار رسوبی جالب در پروفیل ۲۹ این پروفیل را به یکی از بهترین پروفیل‌های ما از حیث حضور رخساره رادار کرده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴-۴۷ و ۴-۴۸ که مقاطع عمقی این پروفیل هستند دیده می‌شود در زیر دو لایه تقریباً ۱۱ و ۱۲ سانتی‌متری، یک رخساره بسیار جالب به چشم می‌خورد که در صورت وجود داده‌های حفاری شاید می‌توانستیم در مورد این پروفیل بیشتر صحبت کنیم. در این پروفیل بعد از ۳۰ متر از ابتدای پروفیل داده‌های ما به دلیل نقص فنی دستگاه کیفیت لازم برای ارائه را نداشتند که به همین دلیل ناچار به حذف بقیه پروفیل شدیم.





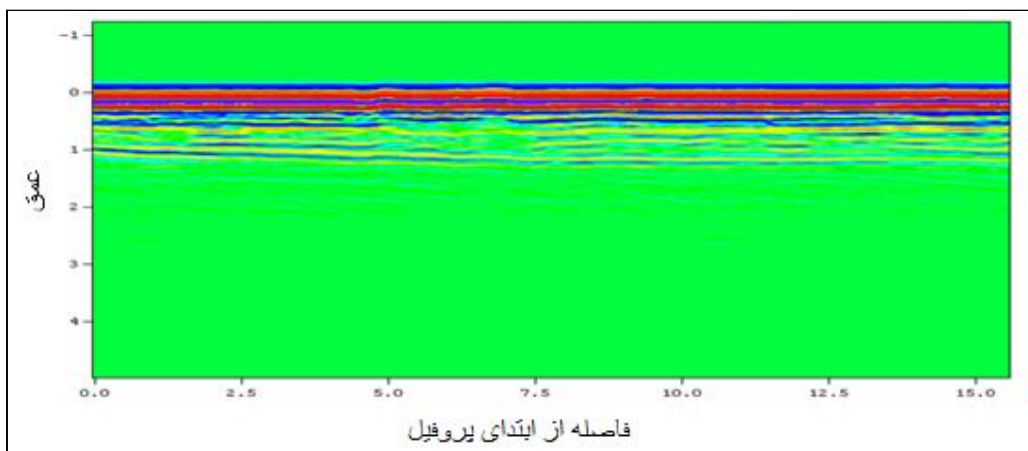
شکل ۴-۴۷: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۹ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC.



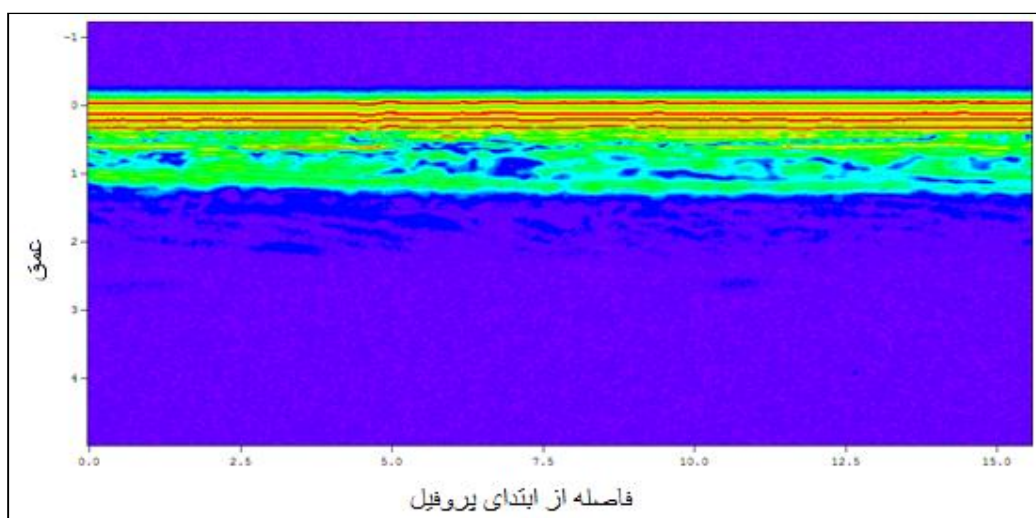
شکل ۴-۴۸: مقطع عمقی پروفیل شماره ۲۹ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope

۳۰- پروفیل ۳۰:

شکل‌های ۴-۴۹ و ۴-۵۰ مقاطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ را نمایش می‌دهند. در این پروفیل نیز دو لایه تقریباً موازی که ضخامت هر دو لایه ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد، دیده می‌شود. در زیر این دو لایه یک ساختار رسوبی به سختی قابل تشخیص است و وضوحش به اندازه پروفیل‌های ۱۴ و ۲۹ نیست ولی اعوجاجاتی که در زیر این دو لایه دیده می‌شود باعث می‌شود که به راحتی نتوانیم احتمال حضور ساختار رسوبی در این منطقه را رد کنیم.



شکل ۴-۴۹: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.

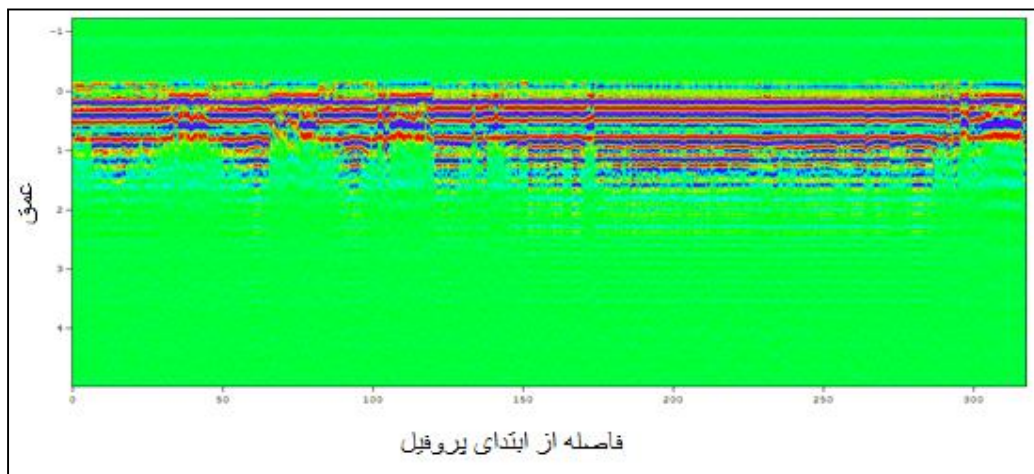


شکل ۴-۵۰: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۰ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope

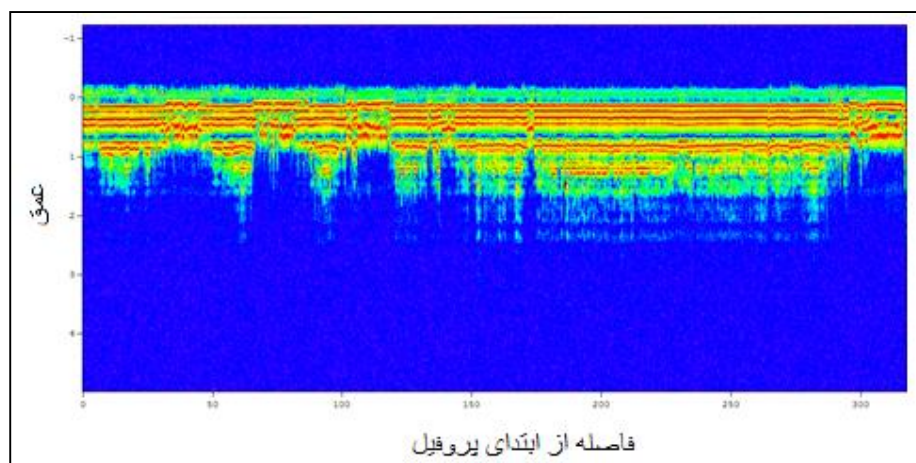
### ۳۳- پروفیل ۳۳:

در این پروفیل تغییرات در عمق نفوذ، در چندین نقطه پروفیل به چشم می‌خورد که این تغییرات در فواصل ۳۵ تا ۵۰ متری، ۷۰ تا ۸۵ متری، ۱۰۵ تا ۱۲۰ متری و ۲۸۰ تا انتهای پروفیل اتفاق می‌افتد. با نگاهی دقیق‌تر به شکل‌های ۴-۵۱ و ۴-۵۲ که مقاطع عمقی این پروفیل را نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که در این پروفیل هر جا که با کاهش عمق نفوذ

مواجه شده‌ایم این کاهش عمق نفوذ با افزایش شدت پاسخ همراه بوده است یعنی اینکه در این نواحی مرز بین رسوبات ریزدانه و رسوبات درشت دانه تیز<sup>۱</sup> تر بوده و پهنای منطقه گذار در این فواصل کمتر بوده و به همین دلیل بازتاب از این مرزها با شدت بیشتری اتفاق افتاده است. در این پروفیل چهار لایه تقریباً موازی که ضخامت‌شان به ترتیب از سطح ۱۰، ۱۵، ۱۲ و ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد دیده می‌شود. در این پروفیل نیز خبری از رخساره‌های راداری نیست.



شکل ۴-۵۱: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC.

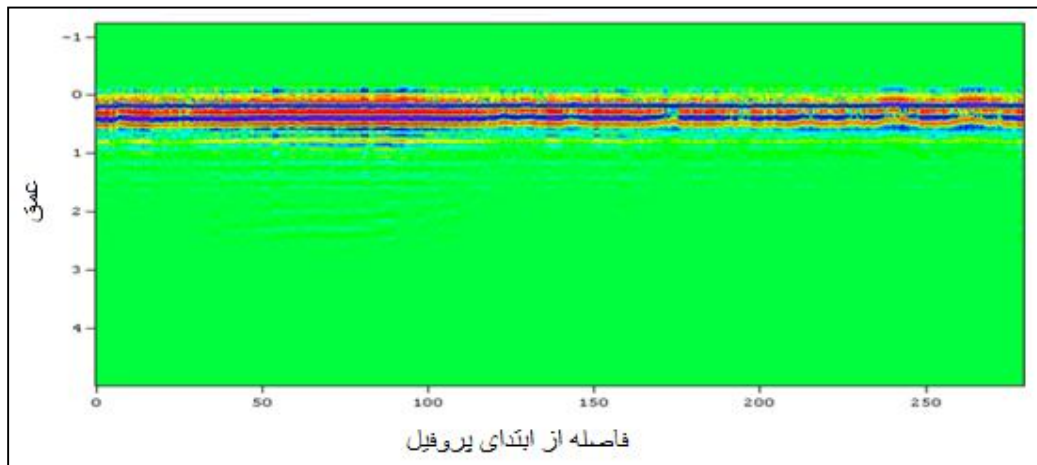


شکل ۴-۵۲: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره AGC و پردازش Envelope

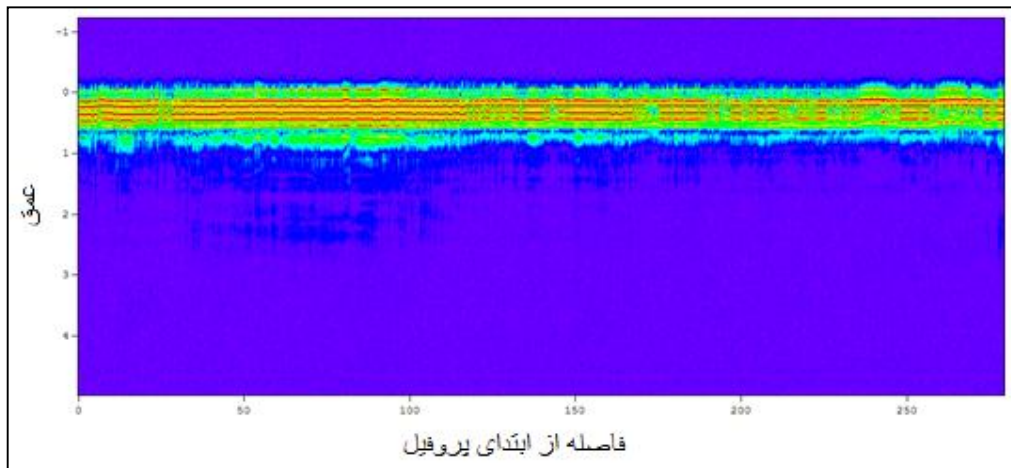
<sup>۱</sup>Sharp

۳۴- پروفیل ۳۴:

شکل‌های ۴-۵۳ و ۴-۵۴ مقاطع عمقی پروفیل ۳۴ را نشان می‌دهند. عمق نفوذ بسیار پایین در این پروفیل بسیار مشهود است و در این پروفیل غیر از سه لایه که ضخامت متوسط آن‌ها در حدود ۱۰، ۱۵ و ۱۳ سانتی‌متر می‌باشد، ساختار دیگری قابل تشخیص نیست. هرچه به سمت انتهای پروفیل می‌رویم از ضخامت لایه‌ها کاسته می‌شود. در این پروفیل نیز مانند بقیه پروفیل‌ها جابجایی پیک طیف فرکانسی رسانندگی بسیار بالای زمین را مورد تأکید قرار می‌دهد.



شکل ۴-۵۳: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره Autogain.



شکل ۴-۵۴: مقطع عمقی پروفیل شماره ۳۴ با اعمال فیلتر Dewow، بهره Autogain و پردازش Envelope.

به طوری که در اکثر پروفیل‌ها مشهود بود، رسانندگی بیش از اندازه زمین که ناشی از رطوبت بالا، شوری، میزان رس بالا و حضور رسوبات سیلتی در این منطقه بود عمق نفوذ در این منطقه را بسیار تحت تأثیر خود قرار داده بود طوری که ما در اکثر پروفیل‌ها عمق نفوذ بیشتر از ۱ متر نداشتیم. این رسانندگی بالای زمین باعث فیلتر شدن هر چه بیشتر فرکانس‌های بالا و جابجایی پیک طیف فرکانسی به سمت مقادیری کمتر از ۲۵۰ مگاهرتز شده بود. ولی نکته قابل توجه در این پروفیل‌ها این است که علیرغم عمق نفوذ پایین، این روش ساختارهای ظریف را با قدرت تفکیک بسیار بالا به نمایش درآورده و می‌تواند لایه‌های با ضخامت اندک را از هم تفکیک کند البته توجه به این نکته بسیار ضروری است که این لایه‌ها که در متن نیز بارها به آن‌ها اشاره شده لایه‌هایی صرفاً ژئوفیزیکی هستند و ممکن است لایه‌های زمین‌شناسی نباشند (که البته این احتمال قوی‌تر می‌باشد زیرا تغییر نوع رسوبات در فاصله‌ای در حدود چند ده سانتی-متر چندان منطقی به نظر نمی‌رسد) اما در هر حال تغییر در یک ویژگی از قبیل نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت-گیری و نحوه چینش، میزان رطوبت، و... باعث تغییر در ثابت دی‌الکتریک و بازتاب از این مرزها شده و ما را بر آن داشته است که تا نتایج حفاری را مشاهده نکرده‌ایم ادعا کنیم که این لایه‌ها حتی اگر از جنس‌های متفاوتی نیستند، حداقل در یک ویژگی خاص متمایزند.

## فصل پنجم

### جمع بندی و نتیجه گیری

## ۵-۱- نتایج

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج زیر را به صورت فهرست‌وار ذکر نمود:

۱- مشخصات الکترومغناطیسی مواد بر روی سرعت، نحوه انتشار و همچنین میزان اتلاف آن‌ها تأثیرگذار است. مهمترین عاملی که عمق نفوذ امواج GPR را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اتلاف امواج در توده‌های زیر سطحی است. رسانندگی محیط تحت بررسی تأثیرگذارترین عامل در اتلاف امواج GPR می‌باشد. به عبارت دیگر در محیط‌های با رسانندگی الکتریکی بالا، امواج رادار به سرعت میرا شده و عمق نفوذ در این محیط‌ها به شدت محدود است. این شرایط به خصوص در محیط‌های رسی و سیلتی معمول می‌باشد، از این‌رو استفاده از روش GPR در این‌گونه محیط‌ها مگر در شرایطی که هدف در عمق کمی واقع باشد، توصیه نمی‌شود.

۲- ضریب بازتاب در فصل مشترک‌های دی‌الکتریک، تابعی از میزان تباین در گذردهی دی-الکتریک ساختارهای زیرسطحی و پهنای منطقه گذار است. در نتیجه پدیده‌هایی نظیر سطح ایستابی، ساختارهای رسوبی و مرز بین واحدهای سنگی به خوبی توسط روش GPR قابل آشکارسازی می‌باشند.

۳- قدرت تفکیک و عمق نفوذ روش GPR تابعی از فرکانس آنتن مورد استفاده و جنس توده‌های زیر سطحی است. اگرچه در استفاده از فرکانس‌های بالا قدرت تفکیک در مقایسه با فرکانس‌های پایین، بالاتر است ولی به همین ترتیب عمق نفوذ در این فرکانس‌ها نسبت به فرکانس‌های پایین روش GPR، کاهش می‌یابد. با توجه به فرکانس‌های مورد استفاده در این روش، روش مذکور از قدرت تفکیک بالاتری در مقایسه با دیگر روش‌های معمول ژئوفیزیک برخوردار است.

## ۵-۲- پیشنهادات

۱- همان‌طور که قبلاً گفته شد به دلیل اینکه داده‌های حفاری و مغزه‌گیری در اختیار نبود، امکان بحث و تفسیر بیشتری (به خصوص در پروفیل‌هایی که رخساره‌های راداری در زیر لایه‌ها به چشم می‌خورند) وجود نداشت، توصیه می‌شود که برای تفسیر بهتر و دقیق‌تر داده‌های GPR، از داده‌های حفاری و مغزه‌گیری و نتایج حاصل از آن‌ها (مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه‌ها، آنالیز شیمیایی و غیره) استفاده شود.

۲- پس از انجام حفاری و مغزه‌گیری و مطالعات لازم بر روی نمونه‌های گرفته شده و به دست آوردن نتایج حاصل از این مطالعات، پیشنهاد می‌گردد که مقاطع GPR مجدداً مورد پردازش و تفسیر و تصحیحات لازم قرار گیرد تا بتوان به نتایج بهتر و مطمئن‌تری دست یافت. لازم به ذکر است که نمونه‌گیری از مغزه‌ها یا سایر حفاری‌های انجام شده و نتایج مطالعات بر روی این نمونه‌ها، فقط به صورت گسسته (ناپیوسته) در نقاط خاصی از منطقه مورد مطالعه انجام شده است. در حالی که بررسی GPR به صورت تقریباً پیوسته و ممتد در طول پروفیل‌های برداشت انجام شده است.

۳- به‌طوری‌که دیدیم به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص منطقه مورد مطالعه ما و رسانندگی بسیار بالای زمین در این منطقه عمق نفوذ بسیار پایین بوده و عموماً کمتر از ۱ متر بود. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که در این‌گونه محیط‌ها حتی‌الامکان از این روش استفاده نشود، مگر در شرایطی که هدف مورد نظر ما در عمق کمی باشد که در این شرایط نیز شاید بهتر باشد که از دستگاهی استفاده شود که فرکانس بالایی نداشته باشد. هرچند استفاده از دستگاه فرکانس پایین قدرت تفکیک را تا حدودی کاهش می‌دهد ولی در صورتی که هدف ما بررسی ساختارهای ظریف نباشد این عمل می‌تواند ضعف روش GPR در محدودیت عمق نفوذ را بهبود بخشد.



۴- استفاده از دستگاه قابل اطمینان می تواند یکی از ویژگی های مهم یک برداشت موفق باشد. همان طور که ملاحظه شد تعدادی از پروفیل های ما به دلیل عدم ثبت در فایل داده ها و یا دارا نبودن کیفیت لازم که از نقص فنی دستگاه ناشی می شد غیر قابل استفاده بودند. به همین دلیل پیشنهاد می شود که قبل از انجام عملیات برداشت حتماً از سالم بودن کلیه قسمت های دستگاه اطمینان حاصل شود.

## فهرست منابع

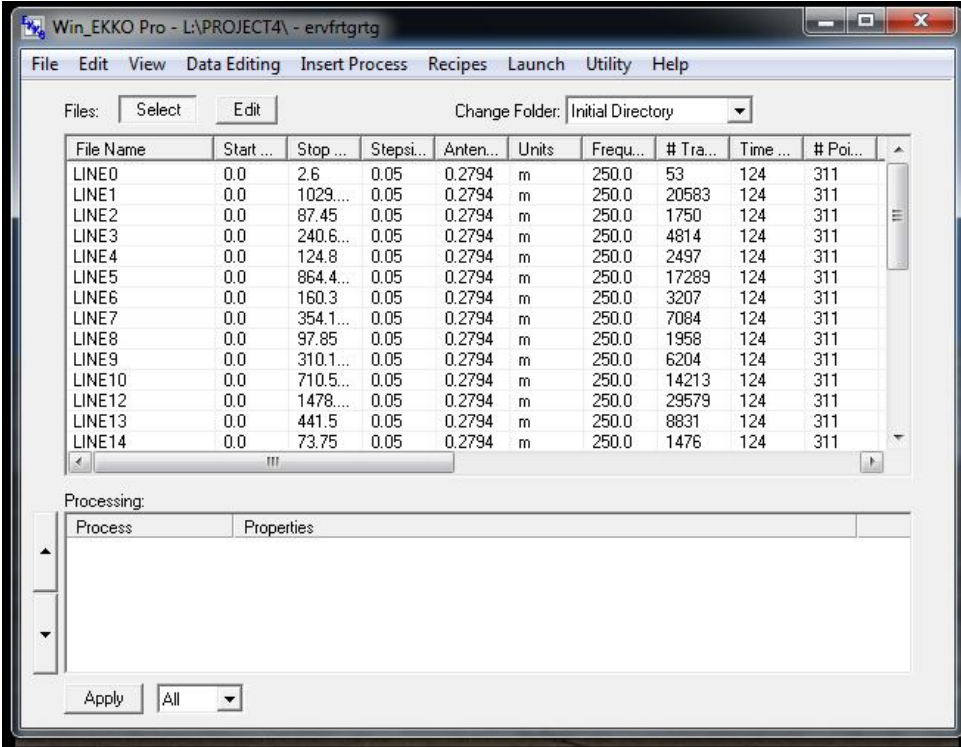
- [۱]. اوپسی مؤخر، م.، قاسمی، و.، شاه نظری، ح.، ۱۳۸۴، مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین: دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- [۲]. اوپسی مؤخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار: مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۸۱-۸۹.
- [۳]. رحیم پور انارکی، ح.، ۱۳۸۵، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی بررسی هیدرودینامیک جریان و پیش بینی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در خلیج گرگان، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، شماره ثبت ۸۴/۳۲۲، صفحه ۲۴۶.
- [۴]. علی‌زاده کتک لاهیجانی، ح.، ۱۳۸۱، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی رسوب‌شناسی و کانی‌شناسی خلیج گرگان، مرکز ملی اقیانوس‌شناسی، صفحه ۶۶.
- [۵]. قاسم‌العسگری، م. ک.، اصول ژئوفیزیک اکتشافی، چاپ اول، انتشارات آبیژ.
- [۶]. مزینانی، ا.، ۱۳۸۹، پایان نامه کارشناسی ارشد، تعیین ضخامت و خصوصیات کیفی آسفالت و خاک زیر سطحی آن و بررسی نمونه‌های آسفالت و اساس به کمک روش *GPR*، دانشکده نفت، معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۷]. محمدی ویژه، م.، ۱۳۸۷، پایان نامه کارشناسی ارشد، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (*GPR*) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه مزبور، دانشکده نفت، معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [8]. Alonso, M. Finn, E.J. 1992. Physics. Addison-Wesley publishers Ltd.
- [9]. Annan, A. P., 1996, Transmission dispersion and GPR. Journal of Exploration Geophysics. 1: 125-136.
- [10]. Annan, A. P., 1997. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario.

- [11]. Annan, A. P., 2001, Ground Penetrating radar workshop note: Sensors and software.
- [12]. Apparao, A., 1997, Developments in geoelectrical methods: A. A. Balkema
- [13]. Baker, G.S., Jordan, T.E., and Pardy, J., 2007, An introduction to ground penetrating radar (GPR), Geological Society of America Special paper 432, p. 1-18,
- [14]. Daniels, J., Roberts, R., and Vendl, M., 1995, Ground Penetrating radar for the detection of liquid contaminants: *Journal of Applied Geophysics* **33**, 195-207.
- [15]. Davis, J. L., Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospect*, **3**, 531-551.
- [16]. Dix, C.D. 1955. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics* **20**: 68-86
- [17]. Fisher, E., McMechan, G. A., Annan, A. P., Cosway, S. W., 1992, Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles: *Geophysics*, **57**, 577-586.
- [18]. Fisher, S.C. Stewart, R.R. & Jol, H.M. 1996. Ground Penetrating Radar (GPR) Data Enhancement Using Seismic Techniques. *JEEG* **1**: 98-96.
- [19]. Gilson, E.W. Redman, J.D. Pilon, J. Annan, A.P. 1996. Near surface application of borehole radar. PEMD #126. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario.
- [20]. Gregory S.B. Thomas, E.J. Jennifer, P. 2007. An introduction to ground penetrating radar (GPR). Geological Society of America. Special paper 432.1-18.
- [21]. Howe, A., 2000, PhD.thesis, "Ground penetrating radar for the parameterization of subsurface hydrological properties", Geography department. King's College London.
- [22]. Kearey, P., Brooks, M., 1991, An Introduction to Geophysical Exploration, Second edition: Blackwell science.
- [23]. Knight, R., 2001, Ground penetrating radar for environmental applications: *Annu. Rev. Earth planet. Sci*, **29**, 229-255.
- [24]. Knoll, M.D. Knight, R. 1994. Relationships between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar. Kitchener, Ontario. 45-61.
- [25]. Kofman, R., Ronen, A., Frydman, S., 2006, Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records: *Journal of Applied Geophysics*, **59**, 284-299.

- [26]. Kroonenberg, S.B., Badyukova, E.N., Storms, J.E.A., Ignatov, E.I., Kasimov, N.S., 2000. A full sea-level cycle in 65 years: barrier dynamics along Caspian shores. *Sedimentary Geology* **134**, 257–274.
- [27]. McNeill, J.D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5. Geonics Ltd, Ontario.
- [28]. Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: *Earth-science reviews*, **66**, 261-330.
- [29]. Parasnis, D. S., 1997, *Principles of applied geophysics*, fifth edition: Chapman and Hall.
- [30]. Powers, M.H. 1997. Modeling frequency-dependent GPR. *The Leading Edge*, SEG, 1657-1662.
- [31]. Reynolds, J. M., 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*: John Wiley.
- [32]. Schmugge, T.J. 1980. Effect of texture on microwave emission from soils. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing* **GE-18**: 353-361.
- [33]. Sensors and software, 1999, a, NOGGIN smart system Users Manual, Version 1.1.
- [34]. Sensors and software, 1999, b, pulse EKKO 100 RUN Users Guide, Version 1.2.
- [35]. Sensors and software, 1999, c, Win\_EKKO Users Guide, Version 1.0.
- [36]. Topp, G.C. Davis, J.L. Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* **16**: 574-582.
- [37]. Young, R. A., Sun, J., 1999, Revealing stratigraphy in ground penetrating radar data using domain filtering: *Geophysics*, **64**, 435-442.
- [38]. Wensink, W.A. 1993. Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1-3000 MHz. *Geophysical Prospecting* **41**: 671-696.
- [39]. [www.Googleearth.com](http://www.Googleearth.com)
- [40]. [www\\_malags.com](http://www_malags.com)
- [41]. [www.Ngdir.com](http://www.Ngdir.com)
- [42]. [www\\_sensoft.ca](http://www_sensoft.ca)
- [43]. Zeng, X., McMechan, G. A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipe: *Geophysics*, **62**, 798-806.

## پیوست (الف): معرفی مختصر نرم افزار Win\_EKKO Pro, V<sup>1</sup>:1.0

Win\_EKKO Pro یک بسته نرم افزاری برای ویرایش و پردازش داده‌های GPR تولید شده توسط دستگاه‌های شرکت Sensors & Software می‌باشد. در شکل الف-۱ صفحه اصلی این نرم افزار نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در هر سطر یک فایل GPR بصورت مجزا قرار گرفته است. هر یک از این فایل‌ها یک پروفیل برداشتی GPR هستند. حداکثر تعداد ستون‌های این جدول ۲۲ ستون می‌باشد. در این ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست اطلاعاتی نظیر نام فایل، موقعیت مکانی ابتدا و انتهای پروفیل، فواصل ایستگاهی، فاصله آنتن‌ها، واحد اندازه‌گیری فواصل، فرکانس مرکزی دستگاه، تعداد ردهای برداشتی، پنجره زمانی و ... به نمایش درآمده است.



File Name	Start ...	Stop ...	Steps...	Anten...	Units	Frequ...	# Tra...	Time...	# Poi...
LINE0	0.0	2.6	0.05	0.2794	m	250.0	53	124	311
LINE1	0.0	1029....	0.05	0.2794	m	250.0	20583	124	311
LINE2	0.0	87.45	0.05	0.2794	m	250.0	1750	124	311
LINE3	0.0	240.6...	0.05	0.2794	m	250.0	4814	124	311
LINE4	0.0	124.8	0.05	0.2794	m	250.0	2497	124	311
LINE5	0.0	864.4...	0.05	0.2794	m	250.0	17289	124	311
LINE6	0.0	160.3	0.05	0.2794	m	250.0	3207	124	311
LINE7	0.0	354.1...	0.05	0.2794	m	250.0	7084	124	311
LINE8	0.0	97.85	0.05	0.2794	m	250.0	1958	124	311
LINE9	0.0	310.1...	0.05	0.2794	m	250.0	6204	124	311
LINE10	0.0	710.5...	0.05	0.2794	m	250.0	14213	124	311
LINE12	0.0	1478....	0.05	0.2794	m	250.0	29579	124	311
LINE13	0.0	441.5	0.05	0.2794	m	250.0	8831	124	311
LINE14	0.0	73.75	0.05	0.2794	m	250.0	1476	124	311

شکل الف-۱: صفحه اصلی نرم افزار Win\_EKKO Pro

در این نرم افزار داده‌های اولیه در یک پوشه ذخیره شده و داده‌های ویرایش و پردازش یافته در زیر پوشه<sup>۱</sup> ای از داده‌های اولیه قرار می‌گیرند. از این‌رو داده‌های اولیه بدون هیچ تغییری دست نخورده باقی مانده و مجدداً در هر زمانی می‌توان برای فعالیت‌های بعدی از آن‌ها استفاده کرد. پردازش داده‌ها شامل ۳۰ عملگر پردازش مختلف می‌باشد. از مهمترین این عملگرها می‌توان به انواع بهره‌ها، فیلترهای زمانی نظیر Dewow، فیلترهای بلاگذر، پایین‌گذر و میان‌گذر و انواع فیلترهای مکانی اشاره کرد.

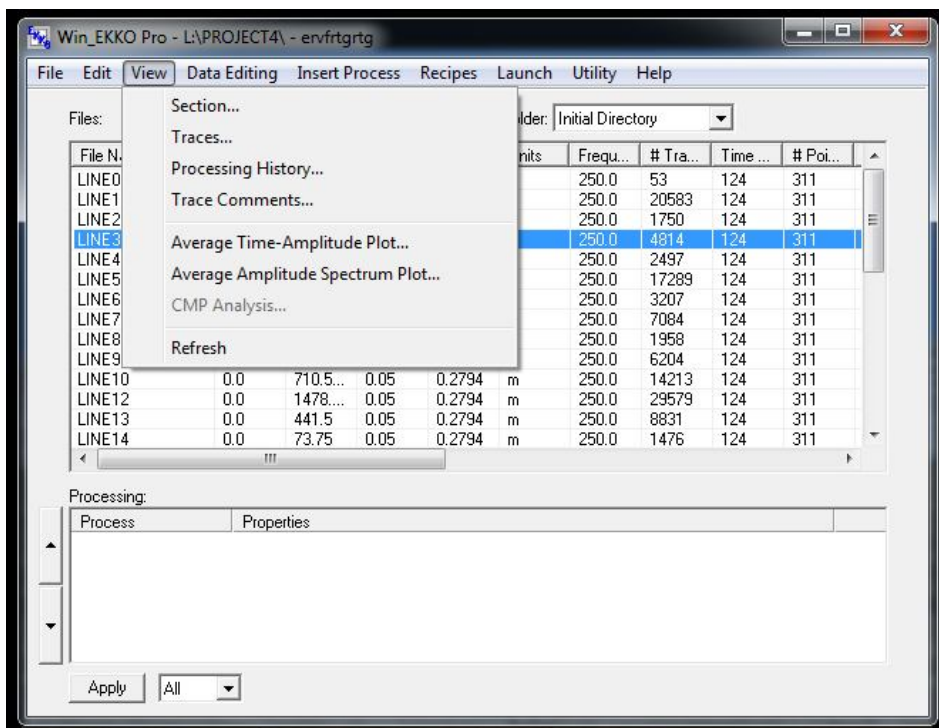
توضیح و حتی معرفی تمام این گزینه‌ها در این مجال کم میسر نیست و برای مطالعه بیشتر در این زمینه مراجعه به راهنمای این نرم افزار خالی از فایده نیست.

نمایش داده‌های GPR با استفاده از سربرگ View امکان پذیر است. همچنین همان‌طور که در شکل الف-۲ دیده می‌شود، با راست کلیک کردن بر روی نام پروفیل‌های مورد نظر، مشاهده مقاطع دو بعدی داده‌های GPR، ردهای جداگانه، پردازش‌های به کار رفته بر روی هر یک از فایل‌ها، اطلاعات مربوط به ردها که در حین برداشت و یا بازبینی داده‌ها به آن‌ها اضافه می‌شوند، امکان پذیر است. لازم به توضیح است که این نرم افزار بصورت مستقل قادر به نمایش مقاطع دو بعدی داده‌های GPR نبوده و برای مشاهده این مقاطع از نرم افزار Transform استفاده می‌شود. این نرم افزار یک نرم افزار علمی تجسمی<sup>۲</sup> قدرتمند است و توسط این نرم افزار می‌توان میزان داده‌های وسیعی را به صورت گرافیکی به نمایش در آورد.

---

<sup>۱</sup>Subfolder

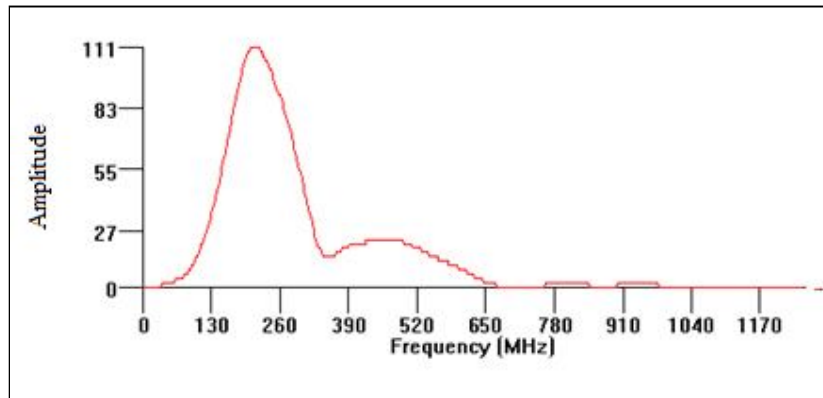
<sup>۲</sup>Visualization



شکل الف-۲: نمایش داده‌های GPR با استفاده از سربرگ View

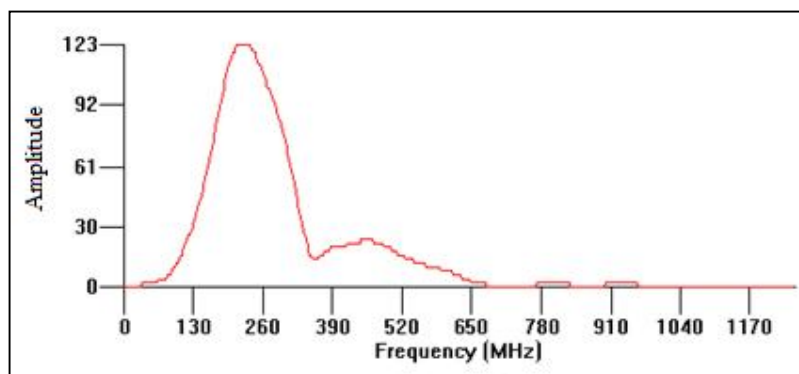
پیوست (ب): طیف فرکانسی پروفیل‌های برداشت شده

۱- پروفیل شماره ۱



شکل ب-۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱

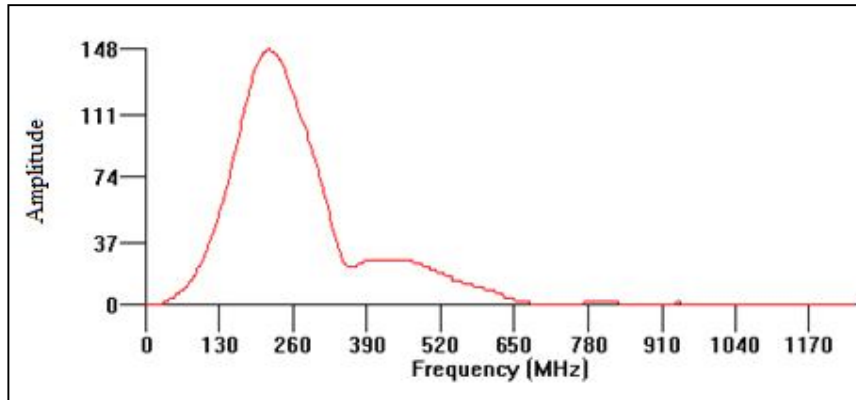
۳- پروفیل شماره ۳



شکل ب-۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳

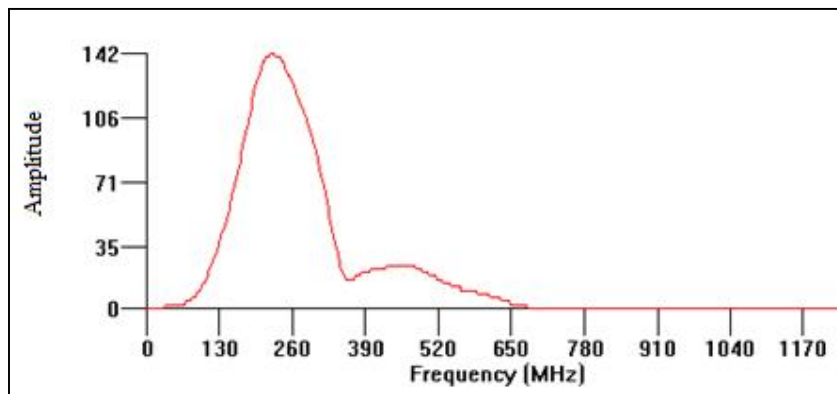


۴- پروفیل شماره ۴



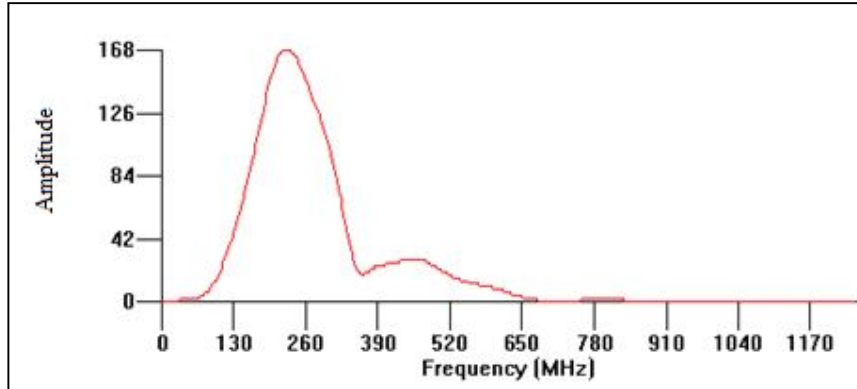
شکل ب-۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۴

۵- پروفیل شماره ۵



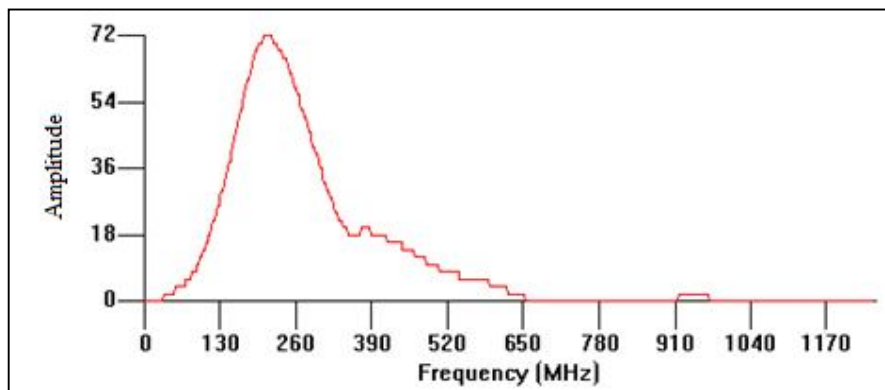
شکل ب-۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۵

۶- پروفیل شماره ۶



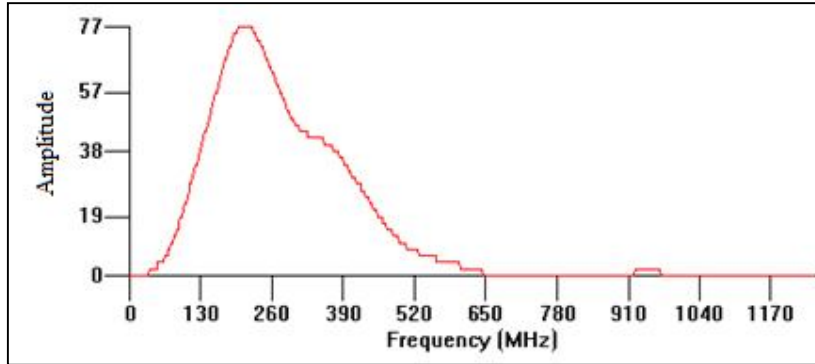
شکل ب-۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۶

۷- پروفیل شماره ۷



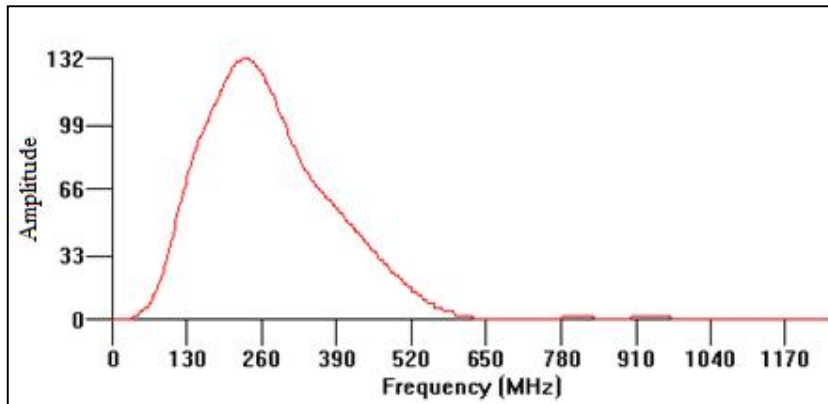
شکل ب-۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۷

۸- پروفیل شماره ۸



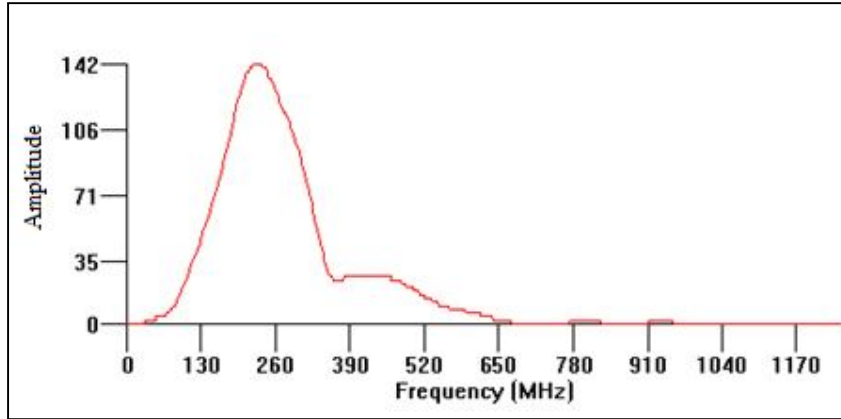
شکل ب-۷: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۸

۹- پروفیل شماره ۹



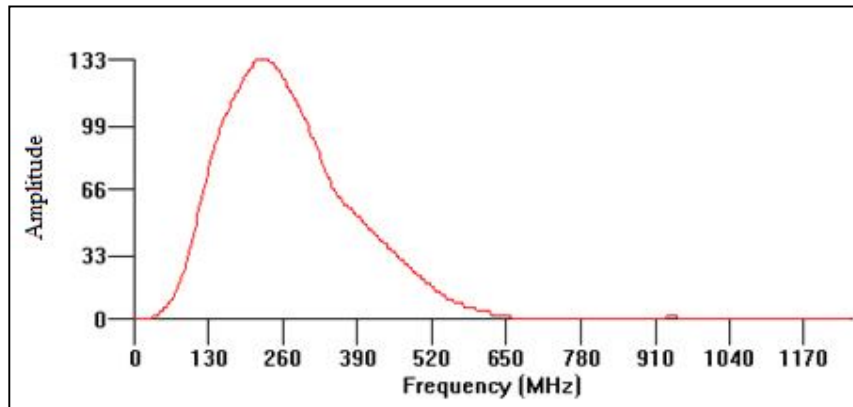
شکل ب-۸: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۹

۱۰- پروفیل شماره ۱۰



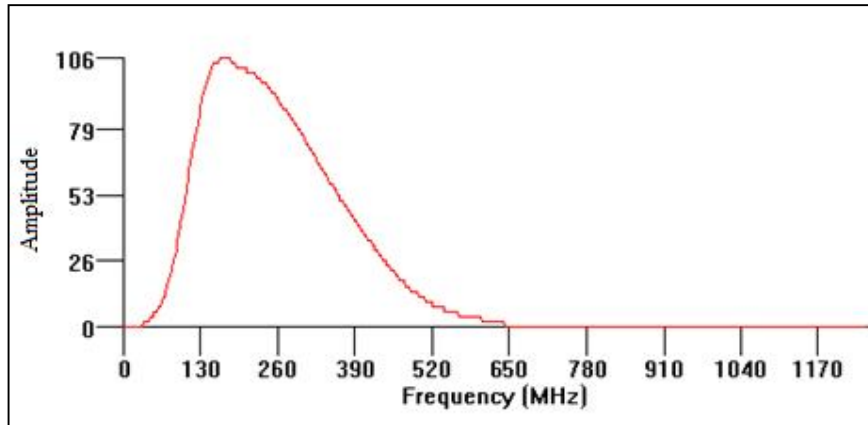
شکل ب-۹: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۰

۱۲- پروفیل شماره ۱۲



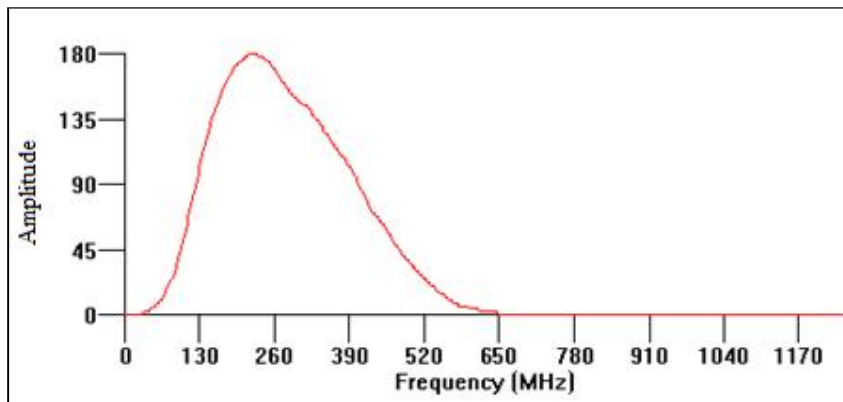
شکل ب-۱۰: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۲

۱۳- پروفیل شماره ۱۳



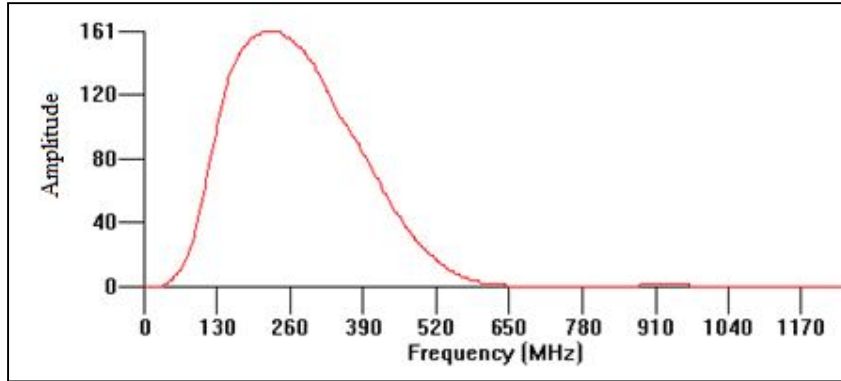
شکل ب-۱۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۳

۱۴- پروفیل شماره ۱۴



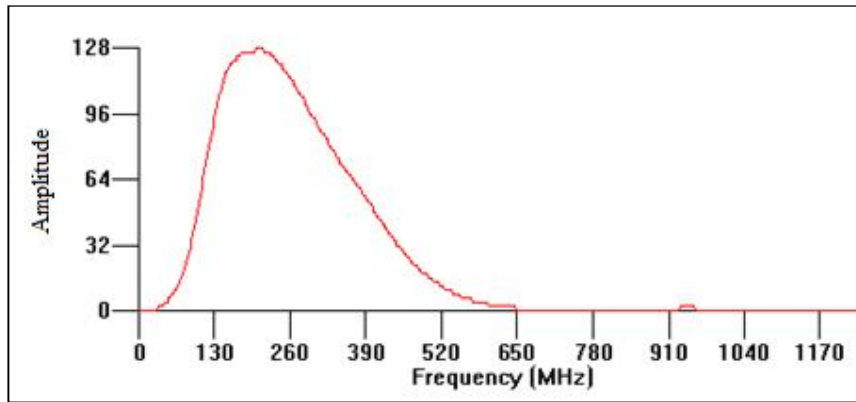
شکل ب-۱۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۴

۱۵- پروفیل شماره ۱۵



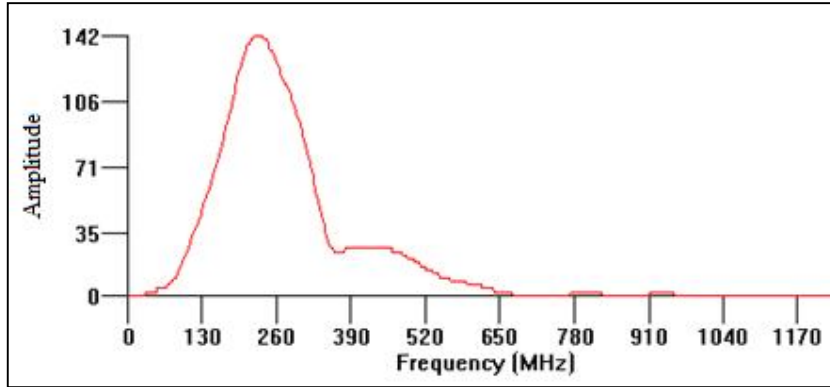
شکل ب-۱۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۵

۱۷- پروفیل شماره ۱۷



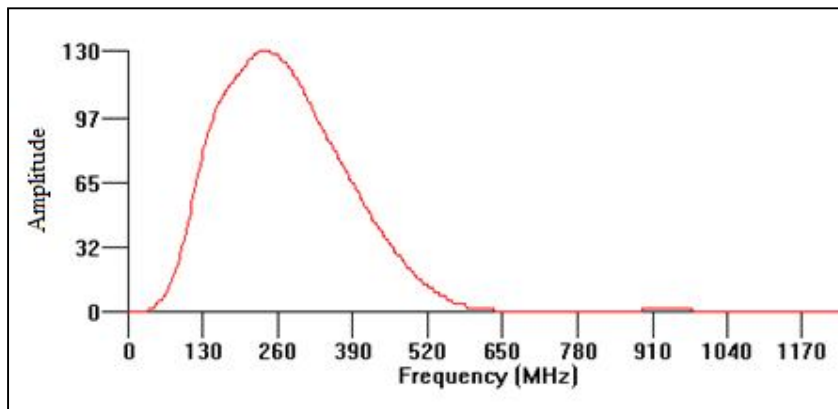
شکل ب-۱۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۷

۱۸- پروفیل شماره ۱۸



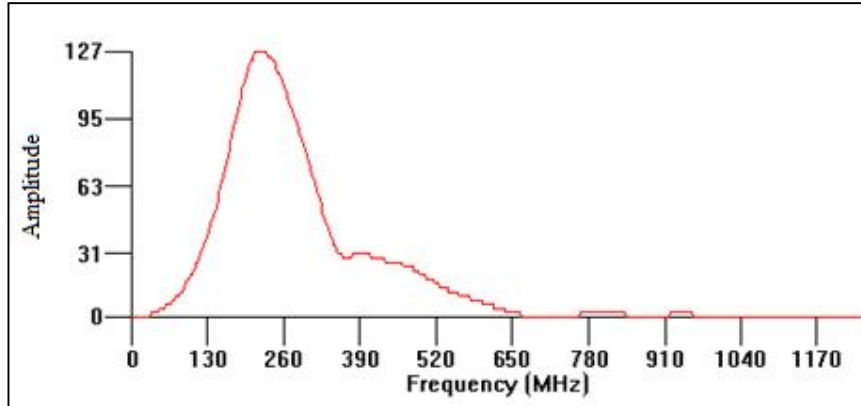
شکل ب-۱۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۸

۱۹- پروفیل شماره ۱۹



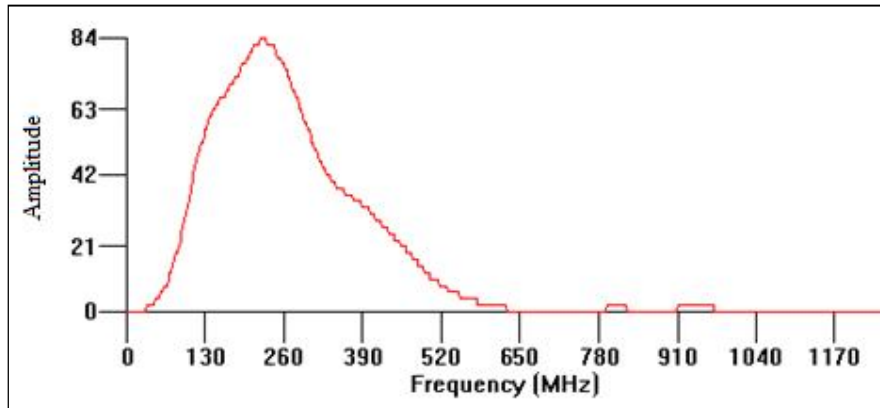
شکل ب-۱۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۱۹

۲۰- پروفیل شماره ۲۰



شکل ب-۱۷: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۰

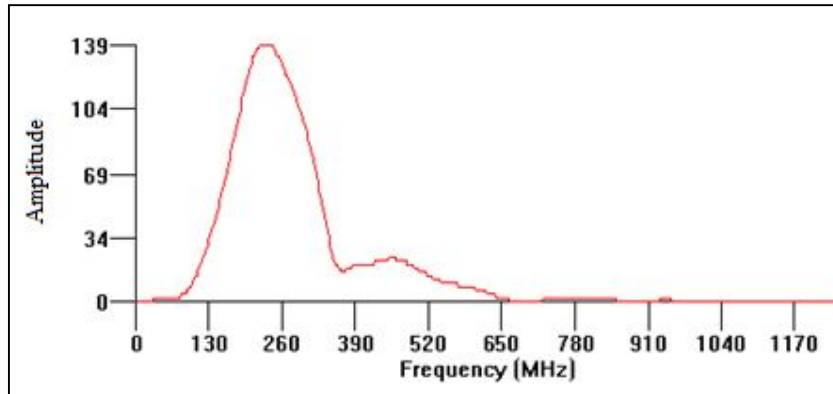
۲۱- پروفیل شماره ۲۱



شکل ب-۱۸: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۱

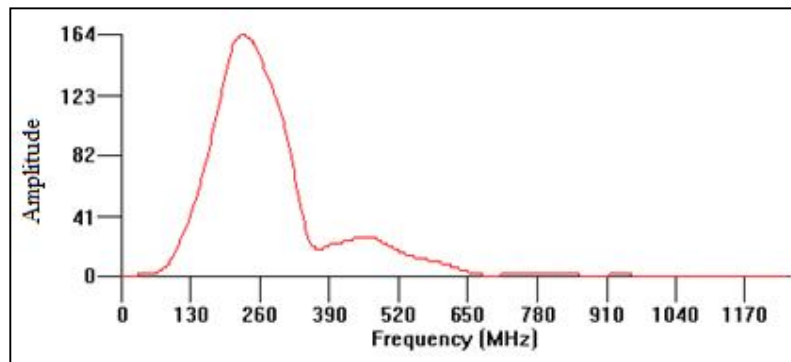


۲۲- پروفیل شماره ۲۲



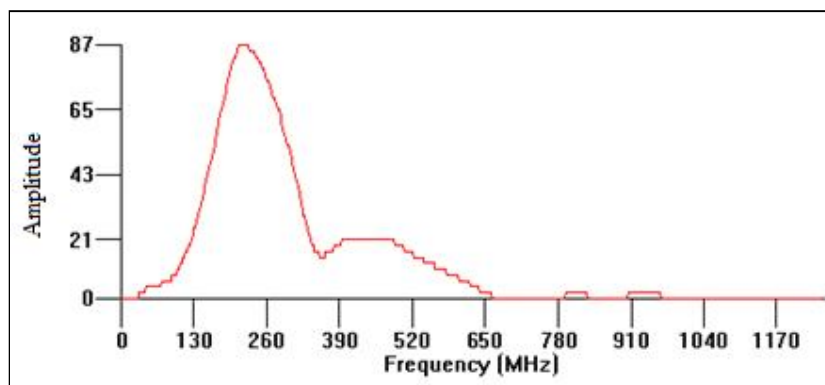
شکل ب-۱۹: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۲

۲۳- پروفیل شماره ۲۳



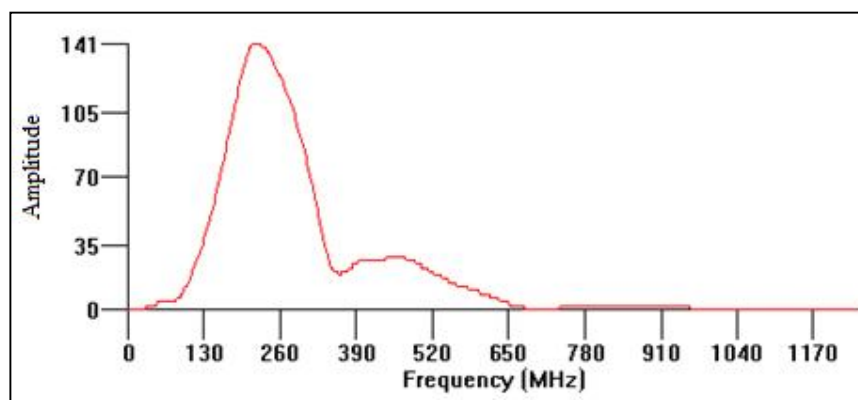
شکل ب-۲۰: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۳

۲۴- پروفیل شماره ۲۴



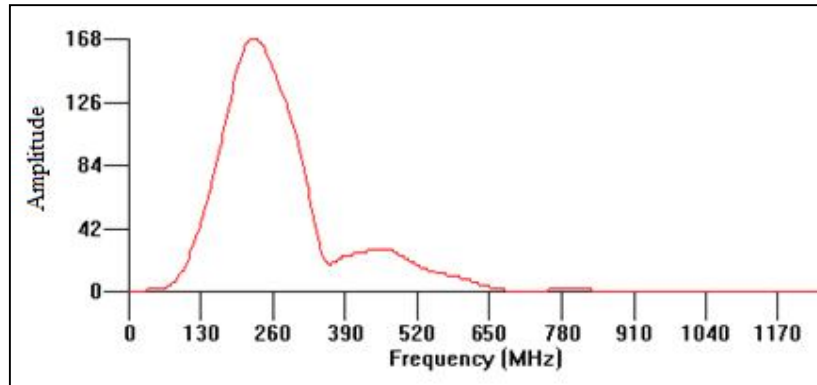
شکل ب-۲۱: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۴

۲۵- پروفیل شماره ۲۵



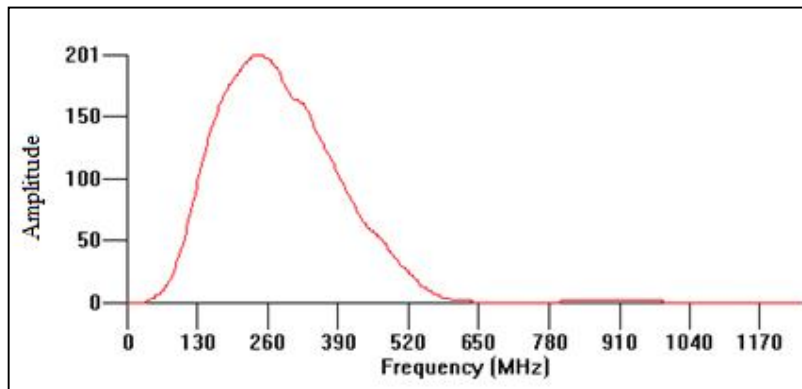
شکل ب-۲۲: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۵

۲۹- پروفیل شماره ۲۹



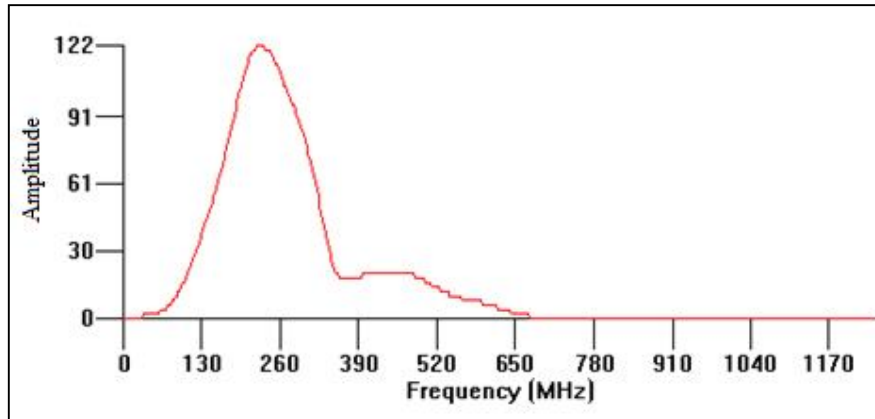
شکل ب-۲۳: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۲۹

۳۰- پروفیل شماره ۳۰



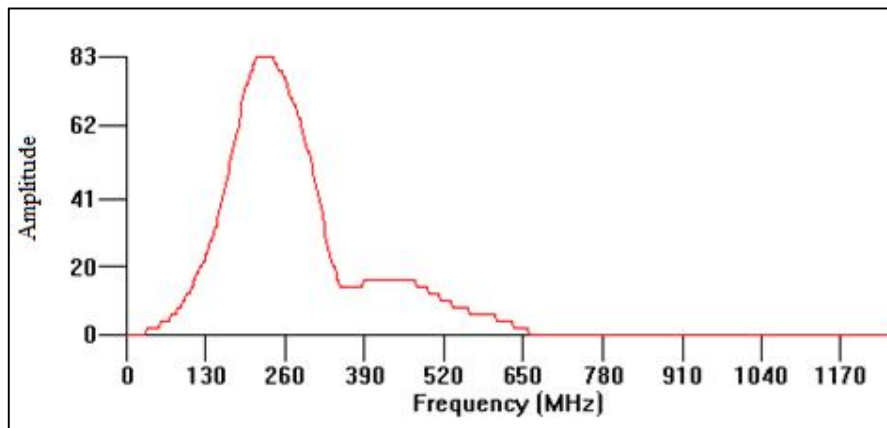
شکل ب-۲۴: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۰

۳۳- پروفیل شماره ۳۳



شکل ب-۲۵: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۳

۳۴- پروفیل شماره ۳۴



شکل ب-۲۶: طیف فرکانسی پروفیل شماره ۳۴