

## رسوب‌شناسی و محیط رسوبی دیرینه آبرفت‌های کواترنر با تلفیق داده‌های رسوب‌شناسی و روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی: منطقه کوچصفهان - استان گیلان)

دارا داس برزین؛ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی تهران

خلیل رضایی\*؛ استادیار رسوب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی تهران

راضیه لک؛ دانشیار رسوب‌شناسی و رئیس سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

مهدی محمدی‌ویژه؛ دکترای ژئوفیزیک، گروه ژئوفیزیک، معاونت اکتشاف، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

حامد مسلمی؛ دانش‌آموخته گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۸

### چکیده

شناسایی آبرفت‌ها، رسوبات، و محیط رسوبی دیرینه‌ت‌نشست آن‌ها در حالتی که در مطالعه آن‌ها از روش‌های ترکیبی استفاده شده همواره اهمیت بالایی دارد. این‌گونه مطالعات ترکیبی معمولاً به روش مستقیم (نمونه‌برداری) و روش غیرمستقیم (روش‌های ژئوفیزیکی) انجام می‌شود. هدف اصلی این تحقیق شناسایی رسوبات و محیط رسوبی دیرینه آبرفت‌های منطقه کوچصفهان با تلفیق داده‌های رسوب‌شناسی حاصل از چاهک‌ها و روش راداری نفوذی به زمین (GPR) بود. برای این منظور، داده‌های رادار نفوذی به زمین به طول ۱۱ کیلومتر در امتداد جاده کوچصفهان به سمت لشت‌نشا برداشت شد. سپس، با توجه به پروفیل‌های راداری ۷ گمانه رسوبی با عمق متوسط ۲/۷ متری جهت تلفیق با داده‌های رسوب‌شناسی حفاری شد. بررسی‌های انجام‌شده به شناسایی ۵ رخساره راداری - شامل خطوط راداری به صورت گسسته و غیرموازی مقعر محدب، خطوط راداری به صورت منحنی‌های پیوسته موازی، خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته، خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم، خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدید - و ۸ رخساره رسوبی ماسه بسیار ریز سیلتی، ماسه ریز، گراول ماسه‌ای، ماسه ریز گراولی، مواد آلی، ماسه درشت سیلتی، ماسه درشت، ماسه گلی با کمی گراول انجامید که نشان‌دهنده قسمت‌های مختلف محیط‌های رودخانه‌ای بود. در این منطقه میزان ذرات دانه‌ریز رسوبی و مواد آلی از جنوب به سمت شمال منطقه افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌گان:** رادار نفوذی به زمین (GPR)، رخساره‌های راداری، رخساره رسوبی، رسوب‌شناسی، محیط رسوبی دیرینه.

### مقدمه

محیط‌های رسوبی بهترین مکان بایگانی ثبت وقایع گذشته است و شواهد رخدادهای اساسی در سطح زمین درون واحدهای رسوبی و ناپیوستگی‌های بین آن‌ها ثبت شده‌اند. شناسایی و تفکیک این واحدهای رسوبی، با اهداف علمی و کاربردی مختلف، هدف بسیاری از پروژه‌ها در زمین‌شناسی بوده است (امینی ۱۳۹۰). معمولاً شناخت وقایع ثبت‌شده درون واحدهای رسوبی کم‌عمق، تعیین ترتیب زمانی وقوع آن‌ها، و شناخت ناپیوستگی‌های موجود بین این واحدهای رسوبی به وسیله مطالعات میدانی و آزمایشگاهی روی نمونه‌های برداشت‌شده از رخنمون‌ها و گمانه‌ها و نیز با تلفیق روش‌های

ژئوفیزیکی، از جمله رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> (GPR)، انجام می‌شود. مطالعات و تحقیقات به وسیله GPR در دهه‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا گسترش یافته است. این روش را نخستین بار در سال ۱۹۰۴ محققان آلمانی، به منظور شناسایی اجسام مدفون در زیر سطح زمین در اعماق کم (Daniels 2004; Reynolds 1997)، به کار بردند. همچنین در سال ۱۹۲۹ برای تعیین عمق یک رودخانه یخ‌زده در اتریش به کار گرفته شد (Stern 1929). استفاده از روش راداری به دلیل در دسترس نبودن ابزار آن در کارهای علمی تا دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ چندان رایج نبود (Anna & Davis 1992). اما، امروزه به دلیل قدرت تفکیک زیاد روش GPR، سرعت بالای برداشت داده‌ها، ایجاد نمای سه‌بعدی از محیط زیرسطحی، و همچنین غیرمخرب بودن این روش در مطالعه اهداف کم‌عمق بسیار رایج است (Neal 2004; Tamora Larissa et al 2016). در کشور ایران، به‌رغم حجم گسترده‌ای از کاربردها و همچنین توانایی‌های بالای این روش در حوزه علوم مختلف، استفاده از آن تا همین اواخر مرسوم نبود. مثلاً خدابخش و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی دون‌های ساحلی شرق بابلسر ۴ رخساره راداری را در رسوبات شناسایی کردند. همچنین احراری رودی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی ساختارهای زیرسطحی رسوبات خور پارک و شو پرداختند. اگرچه استفاده از روش رادار نفوذی به زمین در بررسی‌های رسوب‌شناسی مناطق زیرسطحی کم‌عمق تخریب محیطی و محدودیت‌های زمانی ندارد و نوآوری محسوب می‌شود، عدم اطمینان کافی از تطابق داده‌ها با واقعیت زمین، عمق نفوذ کم در لایه‌های تبخیری و مرطوب و دانه‌ریز، تأثیر عوامل بیرونی (تیر چراغ، دکل‌های مخابراتی، و ...) بر پروفیل‌های راداری از دلایل مهم محدودکننده این روش است.

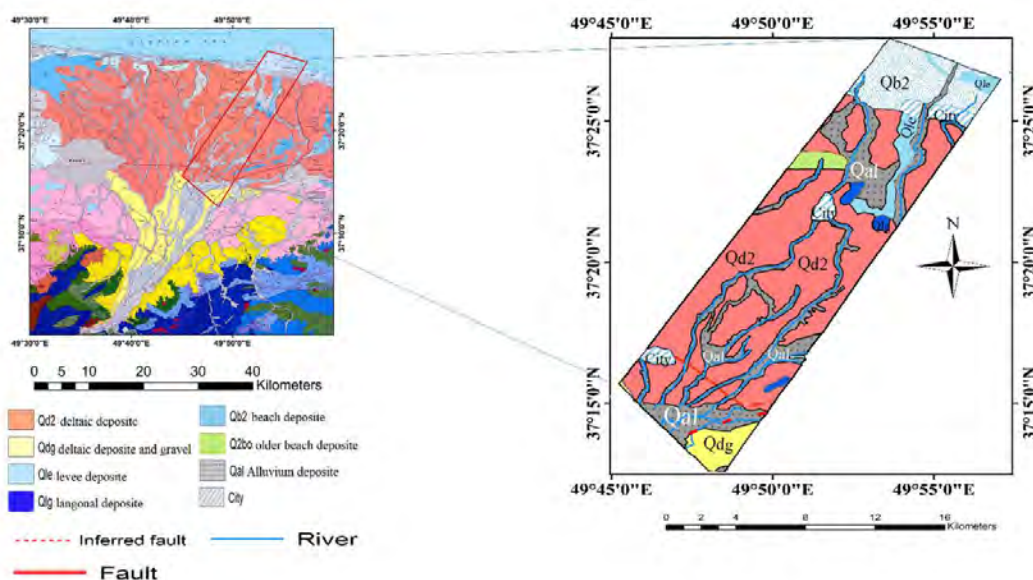
نکته مهم اینجاست که طی مطالعات گذشته تقریباً در همه تحقیقات لزوم انجام گرفتن مطالعات رسوب‌شناسی برای تفسیر بهتر توالی‌های شناسایی شده و تطابق آن‌ها با مطالعات GPR مورد تأکید محققان قرار گرفته است. این تلفیق و ترکیب مطالعات، علاوه بر تفکیک واحدهای مختلف از نظر دانه‌بندی، ممکن است به موارد دیگری نظیر وجود سیال (آب زیرزمینی)، کیفیت و عمق برخورد به آن (سطح ایستایی)، یکنواختی اندازه ذرات (جورشدگی)، جنس ذرات، و ساخت‌های رسوبی بستگی داشته باشد (Xin Shan 2015; Botha et al 2003). هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان تطابق داده‌ها و رخساره‌های تفکیک‌شده به روش رادار نفوذی به زمین و لایه‌ها و توالی‌های رسوبی زیرسطحی و نیز بررسی توانایی به‌کارگیری روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در مطالعات رسوب‌شناسی و تشخیص محیط رسوبی آبرفت‌های دیرینه در منطقه کوچصفهان تا لشت‌نشا، واقع در شمال شرقی شهر رشت، بود.

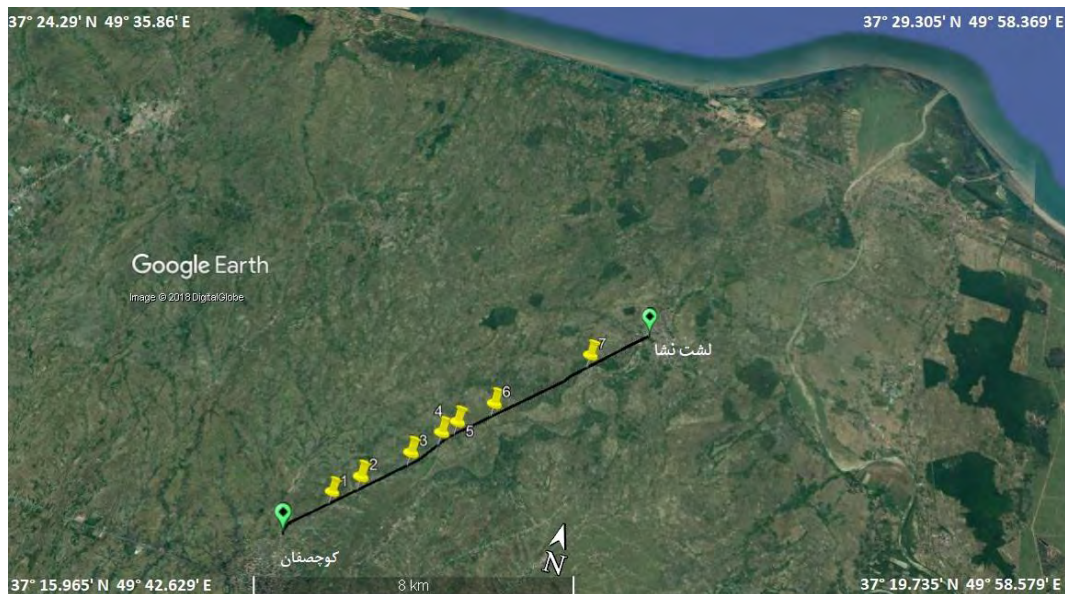
## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در استان گیلان و در حدفاصل شهر کوچصفهان تا لشت‌نشا در دشت ساحلی حاشیه دریای خزر و در حد فاصل طول جغرافیایی ۱۷° ۳۷' تا ۲۱' ۳۷° و عرض جغرافیایی ۴۹' ۴۶° تا ۴۹' ۵۱° قرار دارد. آب‌وهوای منطقه مورد مطالعه از نوع مرطوب و میزان بارندگی سالانه به طور متوسط ۸۰۰ میلی‌متر است. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی، مرز شمالی البرز منطبق بر تپه‌ماهورهای متشکل از نهشته‌های ترشیری و دشت ساحلی خزر است (Alavi 1991). رسوبات این دشت اساساً از فرسایش و تخریب ارتفاعات کوهستانی حاصل شده که با پس‌روی آب دریا مخلوطی از رسوبات

1. Ground Penetration Radar

آبرفتی، دلتایی، مردابی، و ساحلی با ضخامت بسیار متفاوت تشکیل شده است. منطقه مورد مطالعه پوشیده با نهشته‌های آبرفتی جوان است. بنابراین، داده‌های زمین‌شناسی آن در کمترین مقدار است. رسوبات این منطقه بیشتر از رسوبات دلتایی تفکیک‌نشده دریایی و رودخانه‌ای ترکیب یافته است که از رسوبات عمدتاً خوب‌جور شده ماسه‌ای، حاوی خرده‌صدف نرم‌تان و کانی‌های سنگین مگنتیت و ایلمنیت، تشکیل شده است (گزارش زمین‌شناسی مناطق ساحلی دریای خزر ۱۳۹۳). منطقه رشت در شمال بخش غربی رشته کوه البرز جای گرفته است و راستای همگانی ساختاری ناحیه شرقی- غربی تا شمال شرقی- جنوب غربی است. سیمای کلی آن از چین‌خوردگی و گسلش پدیده آمده است (Berberian 1983). دشت ساحلی خزر مورفولوژی تپه‌ماهوری و دشت‌گونه دارد که با پادگانه‌های دریایی یا نهشته‌های آبرفتی جوان زمان حال پوشیده شده است (شکل ۱). شواهد زمین‌شناسی موجود نشان می‌دهد در مورفولوژی گفته‌شده گسله‌های حد کوه و دشت و زمین‌ساخت نقش اساسی دارد و حدفاصل مورفولوژی کوه‌ساز و واحد فیزیوگرافیک دشت‌گونه ممکن است منطبق بر زمین درزه تنیس کهن باشد که باقی‌مانده‌های آن، به‌ویژه جنوب غرب انزلی و ماسوله، برون‌زد دارند. دشت ساحلی رشت- انزلی- آستارا فاقد رخنمون‌های آشکار و پوشیده با نهشته‌های آبرفتی جوان است. به نظر می‌رسد در زیر پادگانه‌های دریایی و پوشش‌های آبرفت دشت ردیف‌های دریایی میوسن- پلیوسن- کوتاه‌تر پاراتتیس وجود داشته باشد که با عقب‌نشینی دریای خزر محیط رسوبی به حاشیه جنوبی آن دریا نقل مکان یافته‌اند. وجود انباشته‌های نفت و گاز در نواحی ساحلی محتمل است (خبازنیا ۱۳۸۲). در این مطالعه حد فاصل کوچصفهان تا لشت‌نشا برای برداشت رادار نفوذی به زمین و حفاری گمانه‌ها جهت نمونه‌برداری از رسوبات انتخاب شد.





شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ رشت (خبازنیا ۱۳۸۲) (بالا) مسیر برداشت پروفیل GPR (خط سیاه)، محل گمانه‌ها (علامت زرد)، عکس برگرفته از گوگل ارث (پایین)

### برداشت‌ها و پردازش داده‌های رادار

در ابتدای کار، داده‌های رادار نفوذی به زمین به وسیله دستگاه GPR، ساخت شرکت سوئدی مالا، با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی، با یدک شدن به یک وسیله نقلیه به طول ۱۱ کیلومتر، از جنوب به سمت شمال منطقه برداشت شد. به دلیل شرایط آب‌وهوایی منطقه و تأثیر بیش از حد رطوبت بر داده‌های راداری سعی شد داده‌ها در فصل تابستان و زمانی که شرایط جوی مناسب و میزان رطوبت هوا پایین است برداشت شود. علت استفاده از این آنتن به دلیل اجتناب از حضور پاسخ اجسام روی زمین (کابل‌ها، تیرهای چراغ برق، وسایل نقلیه، و ...) بر مقطع برداشتی و همچنین سرعت برداشت داده‌ها و نتایج مطلوب آن بود. برای تعیین موقعیت مکانی، از سیستم موقعیت یاب جهانی استفاده شد. با استفاده از این ابزارها فاصله ایستگاه برداشت، بسته به پروفیل مورد نظر و آنتن مورد مطالعه، ۵ یا ۱۰ یا ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با برداشت صحرائی داده‌های رادار نفوذی به زمین، داده‌های حاصل جهت مراحل پردازشی وارد محیط نرم‌افزار Reflex-W شد. بعد از پردازش‌های لازم، با توجه به رخساره‌های راداری تفسیرشده و عمق نفوذ امواج در پروفیل‌های راداری، نقاط مناسب جهت حفاری گمانه‌ها برای برداشت نمونه از رسوبات زیرسطحی انتخاب شدند. در انتهای برداشت نمونه‌های رسوبی، رسوبات جهت آنالیزهای مربوطه به آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه خوارزمی انتقال داده شدند. در مقاطع راداری، به منظور غلبه بر محدودیت‌های ذاتی این داده‌ها، نوبت به پردازش داده‌های حاصل می‌رسد تا رویدادها و پدیده‌ها شکل و محل واقعی خود را بیابند و اشکال مجازی حذف شوند. با وارد کردن داده‌ها به محیط نرم‌افزار Reflex-W روند پردازشی یکسانی برای همه مقاطع راداری دنبال می‌شود. نوع دامنه پردازش‌هایی که برای داده‌های رادار به کار می‌رود به مشخصات سایت (محدوده برداشت)، نوع و مدل دستگاه رادار، نرم‌افزار پردازش، و همچنین هدف کلی برداشت

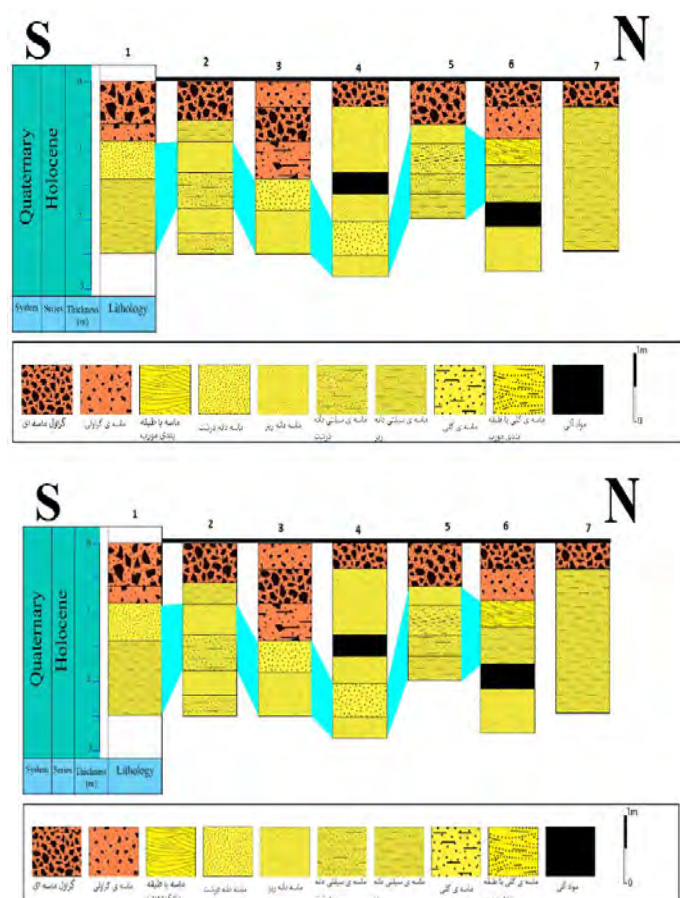
وابسته است (Neal 2004; Tamora Larissa et al 2016). سری داده‌ها در قالب مقاطع خامی است که با امتدادی تقریباً شمالی- جنوبی به طول ۱۱ کیلومتر در رسوبات آبرفتی با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی برداشت شده است. پردازش‌های معمول، که ضرورت استفاده و اعمال در رادارگرام‌های اولیه را دارند، شامل مراحل از قبیل تصحیح داده‌ها، تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی، تصحیح اشباع سیگنال (Dewow) برای حذف پارازیت‌های (نوفه) فرکانس پایین، تصحیح توپوگرافی (برای مناطقی با توپوگرافی ناهموار)، اعمال بهره برای یکسان‌سازی همه سیگنال‌ها و فیلترهای باند گذر و کاهش زمینه است. پس از مطالعه و پردازش داده‌های پروفیل‌های GPR، مکان‌های مناسب جهت حفاری و برداشت نمونه‌های رسوبی با توجه به عمق نفوذ امواج و سطح ایستایی منطقه به تعداد ۷ نقطه انتخاب شد. متوسط عمق گمانه‌های حفاری شده ۲/۷ متر بود. پس از تعیین محل، اقدام به حفاری ۷ چاهک جهت نمونه‌برداری رسوبی و شناسایی لایه‌های زیرسطحی برای تطابق با پروفیل‌های راداری شد. در هر چاهک، با توجه به تغییرات قابل مشاهده- از جمله نوع رسوبات، اندازه دانه‌ها، رنگ آن‌ها، مقدار رطوبت، میزان مواد آلی - نمونه‌های رسوبی برداشت شدند. پس از نمونه‌گیری‌های لازم، نمونه‌ها داخل ظرف پلاستیکی دربسته (جهت جلوگیری از خشک شدن و هوازگی) قرار گرفتند و روی هر یک مختصات محل نمونه‌برداری و عمق برداشت ثبت شد. سپس، نمونه‌ها جهت آنالیزها به آزمایشگاه فرستاده شدند. در این تحقیق از ۷ گمانه مورد بررسی ۴۲ نمونه رسوب برداشت شد. در آزمایشگاه، آزمایش دانه‌بندی بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، شامل خشک کردن و جداسازی مواد آلی و اندازه‌گیری مستقیم ابعاد با کولیس، الک خشک، ته‌نشینی (روش هیدرومتری) انجام شد (خدابخش و همکاران ۱۳۹۴). سپس، برای تجزیه و تحلیل‌های لازم در هر نمونه، با استفاده از نرم‌افزار EXCEL، نمونه‌ها مورد ارزیابی و محاسبه قرار گرفتند. علاوه بر آنالیز اولیه اندازه دانه‌ها، سایر پارامترهای آماری دانه- مانند قطر میانه، میانگین، جورشدگی، کج‌شدگی- اندازه‌گیری شد.

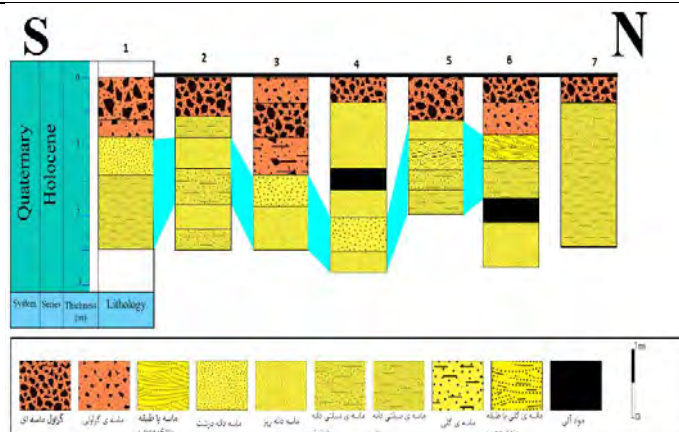
## نتایج و بحث

### رخساره‌های رسوبی

ذرات رسوبی اغلب از تخریب سنگ‌های آذرین، دگرگونی، و رسوبی یا در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل شده‌اند. مطالعه و بررسی خصوصیات مختلف این رسوبات برای تعبیر و تفسیر سنگ‌های رسوبی و محیط تشکیل آن‌ها انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل اندازه دانه یک ابزار ضروری برای طبقه‌بندی محیط‌های رسوبی است و شاهد مهمی برای ته‌نشینی رسوبات، تاریخچه حمل و نقل، و شرایط رسوب‌گذاری فراهم می‌کند (Folk & Ward 1957; Friedman 1979; Bui et al 1990). شناسایی و تفکیک این خصوصیات می‌تواند با استفاده از تلفیق برداشت‌های رسوب‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی انجام شود. در این پژوهش ۷ گمانه رسوبی با ژرفاهای ۲/۵ تا ۳ متر از آبرفت‌های منطقه جهت مطالعات محیط رسوبی و تلفیق با داده‌های ژئوفیزیکی در امتداد شمالی- جنوبی (عمود بر خط ساحلی دریا) حفاری و از دیواره آن‌ها نمونه برداشت شد. مشخصات رسوب‌شناسی نمونه برداشت‌شده در جدول‌های ۱ و ۲ می‌آید. در هر گمانه با توجه به تغییرات قابل مشاهده در بافت و ساخت و رنگ ذرات رسوبی در دیواره گمانه‌ها نمونه‌برداری از رسوبات انجام گرفت (شکل ۲). در منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) ۸ رخساره رسوبی شناسایی شده (به ترتیب

فراوانی) ماسه بسیار ریز سیلتی (zS)، ماسه ریز (s)، گراول ماسه‌ای (Sg)، ماسه ریز گراولی (gS)، مواد آلی (O)، ماسه درشت سیلتی (zS)، ماسه درشت (S)، و ماسه گلی با کمی گراول ((g)mS) است. این رخساره‌ها که نشان‌دهنده محیط‌های کانالی قدیمی و رسوبات دشت سیلابی هستند به احتمال زیاد از تشکیل‌دهنده‌های کانال قدیمی رودخانه سفیدرودند که کانال به سمت شرق تغییر مسیر داده است (سرور ۱۳۸۷؛ کامران‌پور ۱۳۸۳). تغییرات درصد اندازه دانه‌ها در گمانه‌ها دارای تغییرات نامنظم است؛ به صورتی که از بالادست به سمت پایین دست منطقه بر میزان درصد ذرات دانه‌ریز افزوده می‌شود. اندازه ذرات از کف به طرف بالای گمانه‌ها دانه‌درشت‌تر و به سمت ساحل دانه‌ریزتر می‌شود. جورشدگی نمونه‌ها به صورت در اکثر نمونه‌ها به صورت بد و بسیار بد است که نشان‌دهنده نفوذ ذرات دانه‌ریزتر بین دانه‌درشت‌هاست. کج‌شدگی نیز از بالادست به سمت ساحل به سمت راست منحنی و ذرات دانه‌ریز متمایل می‌شود که نشان‌دهنده کاهش شیب منطقه و پایین آمدن سرعت جریان است. منحنی‌های توزیع نیز بیشتر به صورت کشیده است که نشان‌دهنده توزیع مختلف دانه‌هاست که می‌تواند انرژی جریان را در دوره‌های مختلف بیان کند. از بالادست در بیشتر گمانه‌های حفرشده رسوبات، از پایین به سمت بالا، ابتدا توالی ریزشونده و سپس توالی درشت‌شونده دارند که نشان‌دهنده نوسانات انرژی محیط در طول زمان است.





شکل ۲. تطابق جانبی رسوبات زیرسطحی در گمانه‌ها حفاری شده

جدول ۱. مشخصات گمانه‌ها و نمونه‌های رسوبی برداشت‌شده از هر گمانه

مختصات	X:391841 E Y:4128554 N	X:392419 E Y:4129102	X:393460 E Y:4130080 N	X:394063 E Y:4930838 N	X:394379 E Y:413124 N	X:395180 E Y:4132018 N	X:397346 E Y:4134144
شماره چاهک	1	2	3	4	5	6	7
شماره گمانه	6	5	4	3	2	1	
سطح گمانه	گراول ماسه‌ای	گراول ماسه‌ای	ماسه گراولی	گراول ماسه‌ای	گراول ماسه‌ای	گراول ماسه‌ای	گراول ماسه‌ای
شماره نمونه	ماسه ریز گراولی	ماسه ریز سیلتی	گراول ماسه‌ای	ماسه ریزدانه قهوه‌ای‌رنگ	گراول ماسه‌ای	ماسه بسیار ریز گراولی	ماسه ریز سیلتی
کف گمانه	ماسه ریزدانه	ماسه ریزدانه	ماسه گلی با کمی گراول	مواد آلی	ماسه ریز سیلتی	ماسه ریز سیلتی	ماسه ریز سیلتی
	ماسه بسیار ریز سیلتی قهوه‌ای	ماسه درشت سیلتی	ماسه ریزدانه قهوه‌ای‌رنگ	ماسه ریزدانه قهوه‌ای‌رنگ	ماسه ریز گلی	ماسه متوسط‌دانه سیلتی	ماسه ریز سیلتی
	ماسه بسیار ریز سیلتی خاکستری	ماسه ریزدانه	ماسه ریزدانه خاکستری‌رنگ	ماسه درشت‌دانه	ماسه سیلتی	مواد آلی	ماسه ریز سیلتی
	ماسه بسیار ریز سیلتی تیره	ماسه سیلتی	ماسه ریزدانه قهوه‌ای‌رنگ	ماسه ریزدانه	ماسه بسیار ریز سیلتی	ماسه ریزدانه	ماسه ریز سیلتی

## رخساره‌های راداری

تفسیر چینه‌شناسی داده‌های راداری را می‌توان یک نمونه از تفسیر کیفی داده‌ها دانست. چندی بعد از درک این مطلب که داده‌های راداری نیز می‌توانند اطلاعات مفیدی از رسوب‌شناسی در اختیار رسوب‌شناسان قرار دهند، پیشنهاد شد اصول چینه‌شناسی لرزه‌ای برای تفسیر پروفیل‌های راداری به کار رود (Neal 2004; Privanka sharma 2017). اما نتیجتاً توصیه می‌شود که رخساره‌های رادار با توجه به ویژگی بازتاب‌ها از قبیل شکل، شیب، ارتباط بین بازتاب‌ها، و پیوستگی آن‌ها توصیف شوند (Neal 2004; Berton 2019). اصطلاحات ابتدایی برای تفسیر چینه‌ای در شکل ۳ می‌آید که از اصطلاحات موجود در چینه‌شناسی لرزه‌ای استخراج شده‌اند.

### طبقه‌بندی و توصیف رخساره‌های راداری نمایش داده‌شده در پروفیل راداری

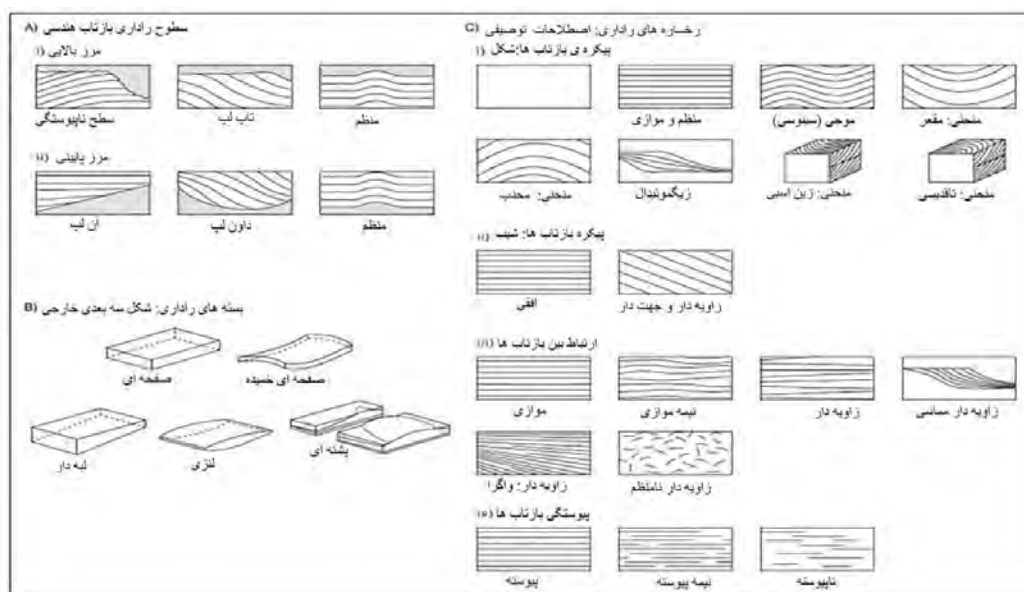
همان‌طور که در بخش‌های قبل آمد، این پروفیل به طول ۱۱ کیلومتر در جهت شمالی-جنوبی برداشت شده است. پس از تفسیر رسوب شناسی، به وسیله عکس‌های دوبعدی رخساره‌های راداری این پروفیل به دست آمد. در این پروفیل ۵ رخساره راداری شناسایی شد (جدول ۱) که در ادامه شرح داده می‌شوند.

جدول ۲. پارامترهای آماری رسوبات برداشت در گمانه‌ها

چاهک	شماره نمونه	شماره نمونه	میانگین	مد	میانگین	جورشدگی		کج‌شدگی		کشیدگی	
			(بر حسب $\phi$ )	(بر حسب $\phi$ )	(بر حسب $\phi$ )						
چاهک شماره ۱	شماره نمونه	۱	۲/۷۵	۴-۳	۴/۲	بد	۱/۴	منفی	-۰/۲	پهن	۰/۸۵
		۲	۲/۶	۳-۴	۳/۳	بد	۱/۵	منفی	-۰/۱۵	پهن	۰/۸
		۳	۲/۶	۴-۳	۳/۷	بد	۱/۲۵	منفی	-۰/۱۶	پهن	۰/۷۸
		۴	۲/۷۷	۱-۲	۰	بسیار خوب	۰/۳۳	منفی	-۰/۰۱	پهن	۰/۹
		۵	۲/۵	۲-۳	۱/۳	بد	۱/۶	منفی	-۰/۰۷	پهن	۰/۷۹
		۶	-۳/۴۵	-۵ - -۴	-۳/۵	بی‌نهایت بد	۴/۳	منفی	-۰/۳	پهن	۰/۶۷
چاهک شماره ۲	شماره نمونه	۱	۱/۸	۲-۳	۲/۴	بد	۱/۸	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۷۴
		۲	۱/۷۵	۱-۲	۱/۷	بد	۱/۷	مثبت	۰/۱۵	پهن	۰/۷۶
		۳	۰/۴	۱-۲	۱/۵	بسیار بد	۳	مثبت	۰/۰۷	پهن	۰/۶۹
		۴	-۰/۵۵	۱-۲	۲/۲	بد	۱/۶	منفی	-۱/۲	پهن	۰/۷۸
		۵	۲/۳۷	۲-۳	۳/۴	بد	۱/۵	مثبت	۰/۰۹	پهن	۰/۸
		۶	-۵/۵	-۵ - -۴	-۳/۴	بسیار بد	۳/۲	منفی	-۰/۱۱	پهن	۰/۷
چاهک شماره ۳	شماره نمونه	۱	۲/۳	۲-۳	۲/۶	بد	۱/۱	مثبت	۰/۱	پهن	۰/۷۶
		۲	۲/۴	۲	۱/۱	بد	۱/۳	مثبت	۰/۰۹	پهن	۰/۷۶
		۳	۲/۴۵	۲	۱/۳	بسیار بد	۳/۴	مثبت	۰/۱۲	پهن	۰/۶۸
		۴	۱/۳	-۵ - -۴	۱/۳	بسیار بد	۳/۶	مثبت	۰/۲۸	پهن	۰/۶۸
		۵	-۲/۳۲	-۵ - -۴	-۶	بی‌نهایت بد	۴	منفی	-۰/۵	پهن	۰/۶۷
		۶	-۴/۵	-۵ - -۴	-۱/۴	بسیار بد	۳	منفی	-۰/۳	پهن	۰/۷۱
چاهک شماره ۴	شماره نمونه	۱	۲/۶	۱-۲	۲/۵	بد	۱/۶	مثبت	۰/۱۲	پهن	۰/۷۸
		۲	۳	۳-۴	۱/۲	بسیار بد	۲/۸	مثبت	۰/۲۲	پهن	۰/۷۱
		۳	۲/۸	۱-۲	۲/۴	بد	۱/۷	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۷۲
		۴	-۲/۵	۲-۳	۰/۲	بد	۱/۸	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۷۶
		۵	-۲/۷	-۵ - -۴	۲/۶	بد	۱/۸	منفی	۰/۱۷۵	پهن	۰/۷۴
چاهک شماره ۵	شماره نمونه	۱	۲/۵	۲-۳	۳/۳	خوب متوسط	۰/۶	مثبت	۰/۱۲۵	پهن	۰/۸۸
		۲	۲/۴۸	۲	۳/۲	خوب متوسط	۰/۵۵	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۸۸
		۳	۱/۸	۳-۴	۲/۵	بد	۲	متقارن	۰/۰۳	پهن	۰/۸۹
		۴	۲	۱-۲	۴/۶	بسیار بد	۲/۴	منفی	۰/۲۴	پهن	۰/۷
		۵	۳/۹	۱	۲/۵	بد	۱/۹	مثبت	۰/۲	پهن	۰/۷۶
		۶	۱	-۴ - -۳	-۳/۴	بی‌نهایت بد	۴/۳	منفی	-۰/۳۷	پهن	۰/۶۸
چاهک شماره ۵	شماره نمونه	۱	۲/۶	۲-۱	۱	بد	۱/۸	مثبت	۰/۲۱	پهن	۰/۷۸
		۲	۲/۷	۴-۵	۳/۷	بد	۱/۶	منفی	-۰/۱۶	پهن	۰/۷۷



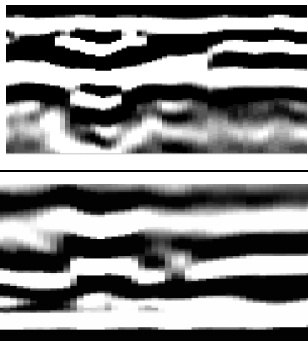
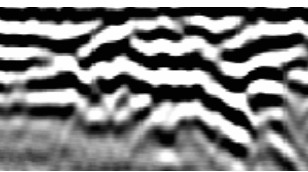

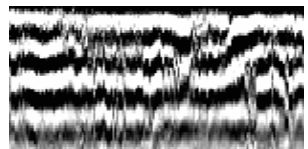
۶		۳	۲/۷	۲	۳/۴	بسیار بد	۲/۸	منفی	-۰/۲۵	پهن	۰/۷
		۴	۲/۵	۴	۱/۱	بی‌نهایت بد	۴	منفی	-۰/۳۹	پهن	۰/۶۷
		۵	۲/۴۵	-۴	-۳/۱	بد	۱/۳	منفی	-۰/۱۱	پهن	۰/۷۹
چاهک شماره ۷	شماره نمونه	۱	۲/۳۵	۳-۴	۳/۳	بد	۱/۵	مثبت	۰/۱۱۵	پهن	۰/۷۶
		۲	۲/۴	۵	۳/۲	بد	۱/۲	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۷۶
		۳	۲/۶	۳-۴	۳/۴	بد	۱/۳	مثبت	۰/۱۰۸	پهن	۰/۷۷
		۴	۲/۷	۳-۴	۳	بد	۱/۳۵	مثبت	۰/۱۳	پهن	۰/۷۸
		۵	۲/۷	۳-۴	۳/۱	بد	۱	مثبت	۰/۱۳۵	پهن	۰/۷۷
		۶	-۲/۳	۳-۴	۳	بد	۱	منفی	-۰/۱	پهن	۰/۷۴



شکل ۳. تحلیل رخساره‌های راداری برگرفته از تحلیل داده‌های لرزه‌ای (Neal 2004)

جدول ۳. رخساره‌های راداری شناسایی شده در طول پروفیل راداری

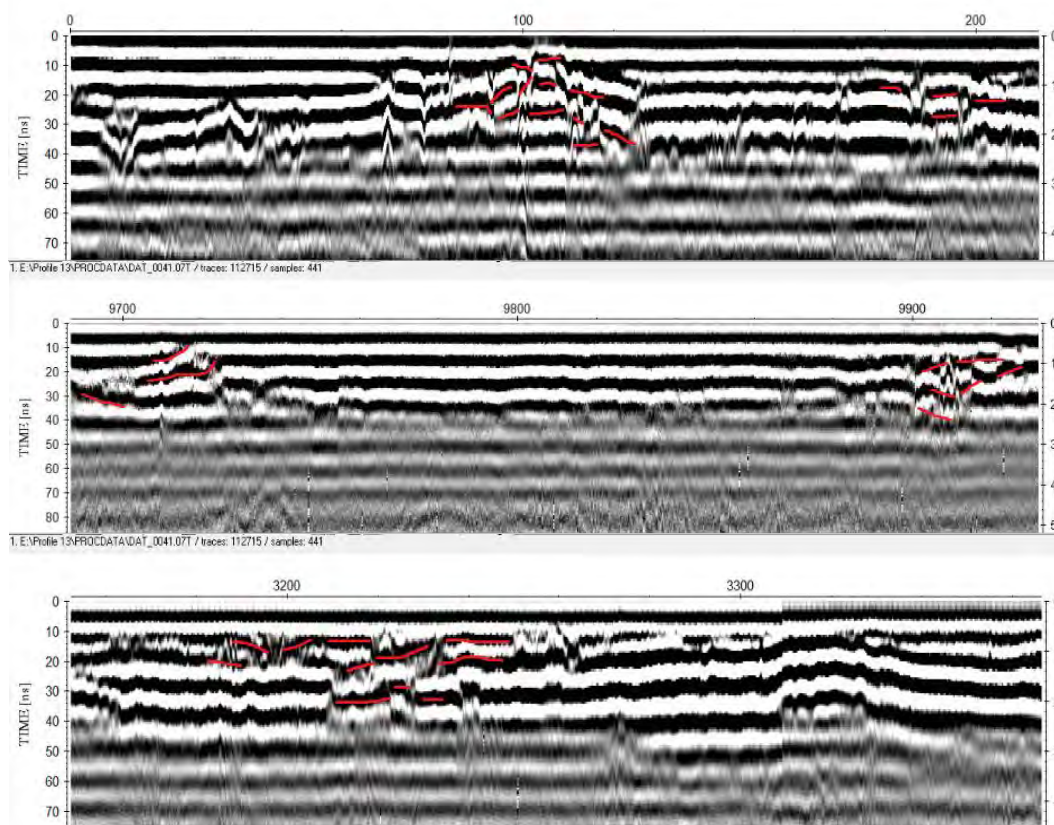
توصیف رسوب‌شناسی	تصویر	توصیف	
نهشته‌های پیوسته بار که اخیراً ته‌نشست شده‌اند.		خطوط راداری به صورت گسسته و غیرموازی	رخساره راداری
		مقر محدب	شماره ۱

نهبشته‌های کانالی قدیمی		خطوط راداری پیوسته و به صورت محدب مقعر	خساره راداری شماره ۲
چاله و کندگی‌های دوباره پر شده		خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته	رخساره راداری شماره ۳
ته‌نشست‌های آبرفتی قدیمی		خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم	رخساره راداری شماره ۴
نهبشته‌های زیرسطحی دارای مواد آلی		خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدید	رخساره راداری شماره ۵

### مشخصه ظاهری رخساره‌ها

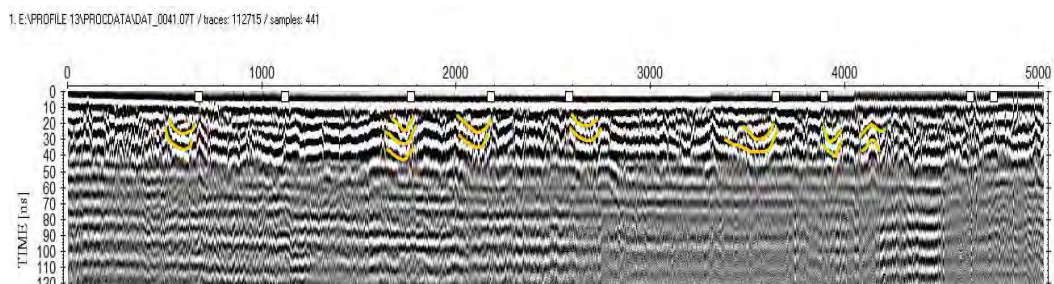
رخساره راداری اول، خطوط راداری به صورت گسسته و غیرموازی مقعر محدب (۱)، رخساره راداری دوم، خطوط راداری به صورت منحنی‌های پیوسته موازی (۲)، رخساره راداری سوم، خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته (۳)، رخساره راداری چهارم، خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم (۴)، رخساره راداری پنجم، خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدید (۵) است. اولین ارزیابی کیفی پروفیل‌های راداری بر اساس طبقه‌بندی‌های بروک اسمیتز و همکارانش (۲۰۰۶) و پارکر و همکارانش (۲۰۰۸) بود که در مطالعه رسوبات و بررسی رخساره‌های راداری رودخانه ساسکچون جنوبی انجام شد (Broke Smith et al 2006b; Parker et al 2008). ارزیابی شامل بررسی نسبی ارتباط عمودی رخساره‌هاست. این کار منجر به برآورد عمق رسوب در طول هر پروفیل شده است. رخساره راداری شماره ۱: خطوط راداری به صورت گسسته و غیرموازی مقعر محدب هستند که حدوداً در ۵۰ درصد طول مقطع و به طور متوسط در عمق صفر تا ۱/۸ متری دیده می‌شوند. دارای طول موج با پیک منفی اند که به رسوبات

تازه‌نهشته‌شده پوینت بار نسبت داده می‌شوند و دانه‌ها بیشتر در اندازه ماسه و همراه کمی گراول‌اند. این الگوی بازتابی حدوداً ۲۰ درصد کل پروفیل را تشکیل داده است (شکل ۴ الف و ۴ ب و ۴ ج).



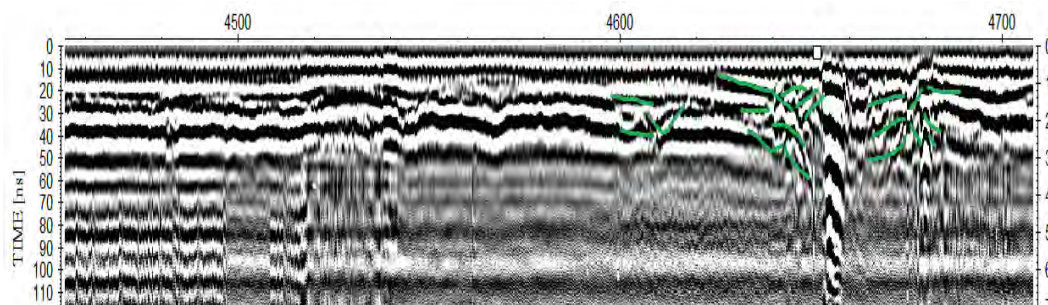
شکل ۴. بازتاب‌های راداری که به صورت گسسته و غیرموازی مقعر محدب (خطچین قرمز) در عمق ۰/۵ تا ۲ متری گسترش دارند و حدوداً ۲۰ درصد رادار را تشکیل داده‌اند.

رخساره راداری شماره ۲: خطوط راداری پیوسته و به صورت محدب مقعر (خطچین زرد) هستند که به راحتی در مقاطع راداری دیده می‌شوند و این الگوهای بازتابی محیط‌های کانالی قدیمی و نهشته‌های آن را نشان می‌دهند و حدوداً ۳۰ درصد مقطع راداری را تشکیل داده‌اند. دانه‌ها بیشتر در اندازه ماسه‌اند و طول موج با پیک فاز مثبت دارند (شکل ۵).



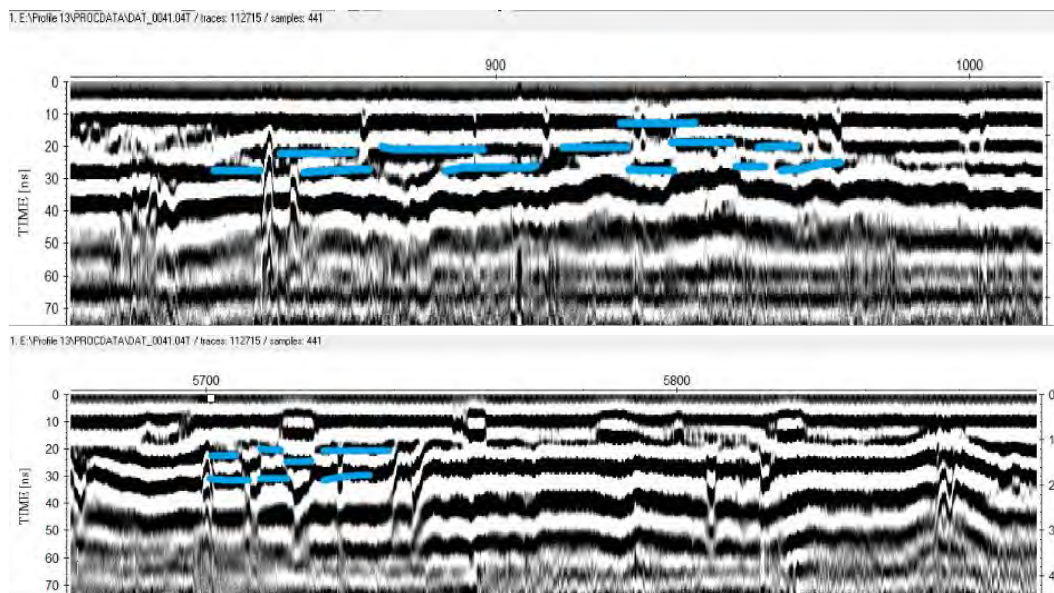
شکل ۵. اشکال خطوط راداری پیوسته و به صورت محدب مقعر (خطچین زرد) دارای طول موج با پیک مثبت‌اند که نشان‌دهنده محیط‌های کانالی قدیمی است.

رخساره راداری شماره ۳: خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته و اغلب دارای شیب به سمت شمال هستند. این رخساره اکثراً در عمق ۱/۲ تا ۱/۷ متری قرار گرفته و به کنده‌شدگی و چاله‌های دوباره‌پرسیده مربوط است. دانه‌ها در اندازه ماسه ریز و دارای مقدار کم سیلت و رس هستند. حدوداً ۱۰ درصد از پروفیل GPR را تشکیل می‌دهند (شکل ۶).



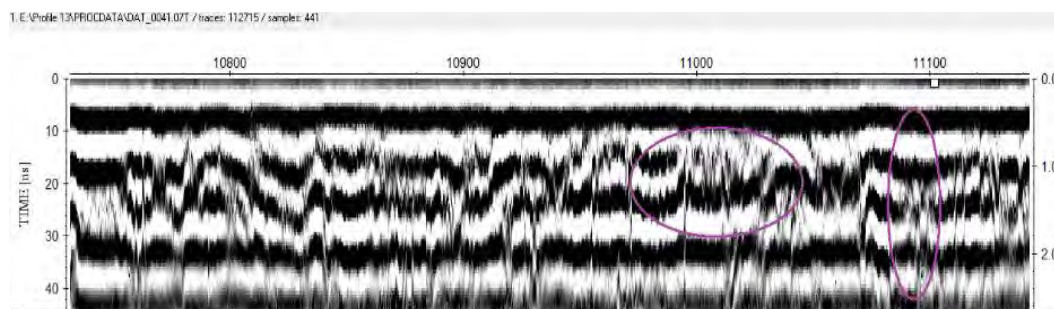
شکل ۶. خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته و دارای طول موج با پیک منفی هستند (خطچین سبز) که حفره‌ها و چاله‌های دوباره‌پرسیده را نشان می‌دهند.

رخساره راداری شماره ۴: خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم (خطچین آبی) هستند که عمدتاً در عمق ۱ تا ۱/۲ متری گسترش دارند و در حدود ۵ درصد پروفیل راداری را تشکیل داده‌اند. بر اساس طبقه‌بندی‌های اسمیتز بروک و همکارانش (۲۰۰۶) و پارکر و همکارانش (۲۰۰۸) این رخساره‌ها به رسوبات آبرفتی قدیمی مربوط‌اند و بیشتر در اندازه ماسه‌اند (شکل ۷ الف و ب).



شکل ۷. خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم (خطچین آبی) که عمدتاً در عمق ۱ تا ۱/۲ متری گسترش دارند و در حدود ۵ درصد پروفیل راداری را تشکیل داده‌اند. این رخساره‌ها به رسوبات آبرفتی قدیمی مربوط‌اند.

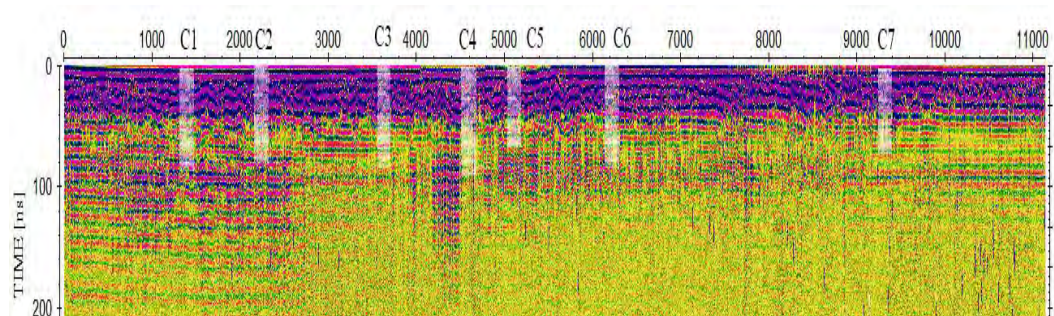
رخساره راداری شماره ۵: خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدیدند که عمدتاً در قسمت انتهایی پروفیل شماره ۲ قابل مشاهده‌اند و مواد آلی و رسوبات زیرسطحی با میزان رطوبت بالا را نشان می‌دهند. علت این میرایی نفوذ و گسترش زون اشباع است که در گمانه‌های رسوبی نیز مشاهده شد (Carolina et al 2019) (شکل ۸).



شکل ۸. خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدید (دایره بنفش)

### تطابق رخساره‌های رادار با رسوب‌شناسی

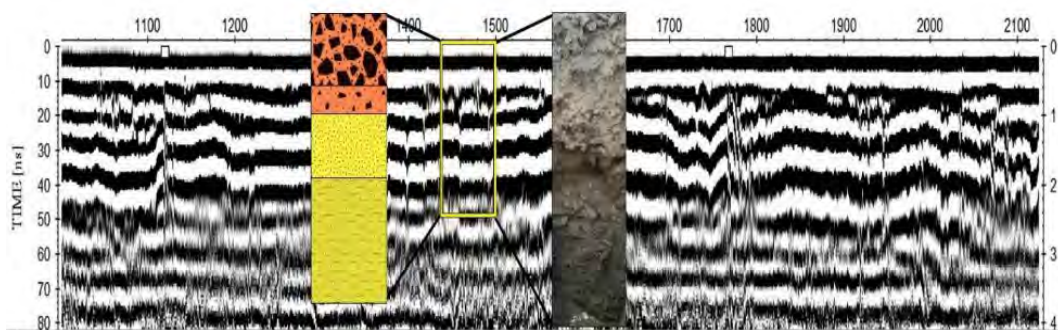
در امتداد پروفیل راداری برداشت‌شده به طول ۱۱ کیلومتر ۷ گمانه رسوبی بر اساس رخساره‌های راداری و عمق نفوذ امواج راداری جهت شناسایی و بررسی رسوبات زیرسطحی انجام گرفت (شکل ۹). بر اساس مطالعات رسوب‌شناسی ۸ رخساره رسوبی که اکثراً بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) دانه‌ها در اندازه ماسه ریزند شناسایی شدند. ۵ رخساره راداری نیز بر اساس طبقه‌بندی‌های بروک اسمیتز و پارکر، که از مطالعه و بررسی رخساره‌های راداری رودخانه ساسکچون جنوبی حاصل شده است، شناسایی شدند (Sambroke Smithe & Parker et al 2006b & 2008). از انطباق داده‌های راداری با داده‌های رسوب‌شناسی برای بازسازی محیط رسوبی دیرینه استفاده شد.



شکل ۹. موقعیت گمانه‌های حفاری شده روی پروفیل راداری

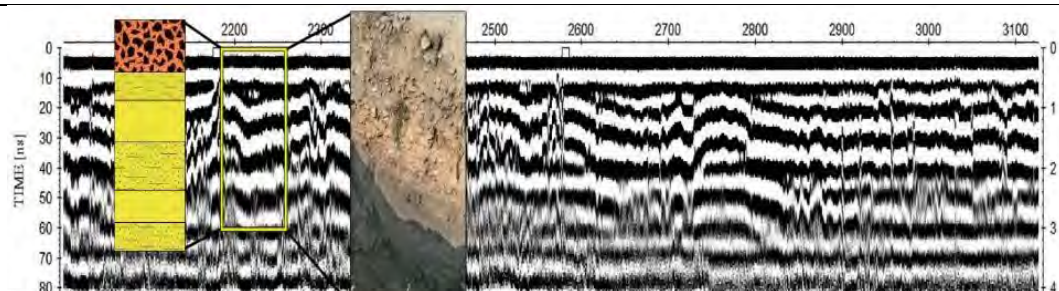
گمانه شماره ۱ در فاصله ۱۴۴۰ متری از شروع پروفیل راداری قرار دارد. رسوبات این گمانه عمدتاً از تناوب ماسه بسیار ریز سیلتی، ماسه ریز، ماسه ریز گراولی، و گراول ماسه‌ای تشکیل شده است. با توجه به تغییرات قابل مشاهده ۶ نمونه رسوبی برداشت شد. رسوبات در این گمانه از سطح تا عمق ۶۰ سانتی‌متری از گراول ماسه‌ای به رنگ خاکستری

روشن، از عمق ۶۰ سانتی متری تا ۹۵ سانتی متری از ماسه ریز گراولی به رنگ قهوه‌ای روشن، از عمق ۹۵ سانتی متری تا ۱۴۰ سانتی متری از ماسه ریزدانه به رنگ قهوه‌ای، و از عمق ۱۴۰ سانتی متری تا ۲۵۰ سانتی متری از ماسه بسیار ریز سیلتی به رنگ‌های قهوه‌ای و خاکستری تیره تشکیل شده است. از سطح گمانه تا عمق ۱۰۰ سانتی متری گرهک‌های نارنجی‌رنگی از اکسید آهن در لایه‌های رسوبی دیده می‌شود. در این گمانه توالی درشت‌شونده از عمق به سمت سطح گمانه دیده می‌شود. وضوح پروفیل راداری به دلیل میرا شدن سیگنال‌ها در این پروفیل در اثر وجود زون اشباع و دانه‌ریز بودن رسوبات زیاد واضح نیست؛ طوری که در تطابق با لایه‌های رسوبی داده‌های راداری تغییرات محسوسی دیده نمی‌شود (شکل ۱۰).



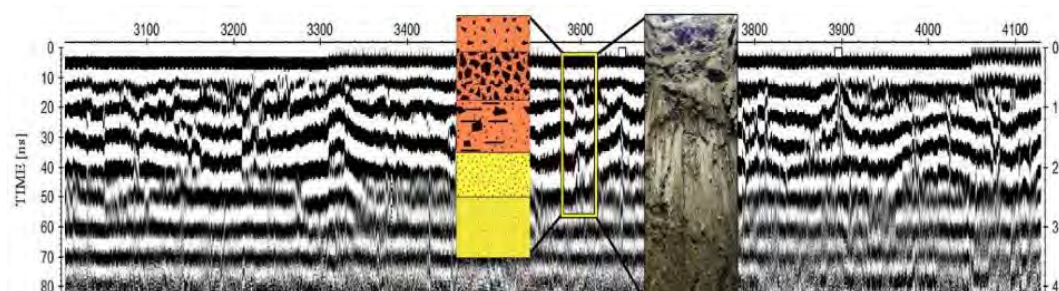
شکل ۱۰. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه اول با پروفیل راداری

نمونه‌های رسوبی در گمانه ۲ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR شماره ۲ انطباق داده شد. این گمانه در ۲۲۴۰ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. رسوبات این گمانه با تناوبی از ماسه سیلتی، ماسه ریزدانه، ماسه درشت سیلتی، ماسه ریزدانه، ماسه ریز سیلتی، و گراول ماسه‌ای تشکیل شده است. در این گمانه ۶ نمونه رسوبی با توجه به تغییرات قابل مشاهده برداشت شد. از سطح تا عمق ۵۵ سانتی متری از رسوبات گراول ماسه‌ای به رنگ خاکستری، از عمق ۵۵ سانتی متری تا ۹۰ سانتی متری از ماسه ریز سیلتی به رنگ قهوه‌ای روشن، از عمق ۹۰ سانتی متری تا ۱۳۵ سانتی متری از ماسه ریز به رنگ خاکستری، از عمق ۱۳۵ سانتی متری تا ۱۸۰ سانتی متری از ماسه درشت سیلتی به رنگ خاکستری تیره، از عمق ۱۸۰ سانتی متری تا ۲۲۰ سانتی متری از ماسه ریزدانه به رنگ خاکستری تیره، و از عمق ۲۲۰ سانتی متری تا ۲۵۰ سانتی متر از ماسه سیلتی به رنگ قهوه‌ای تیره تشکیل شده است. از سطح تا عمق ۵۰ سانتی متری آثار گیاهی و قطعات چوبی وجود دارد. در این گمانه دو توالی درشت‌شونده از عمق به سمت سطح گمانه دیده می‌شود. بیش از ۸۰ درصد ذرات این گمانه در اندازه ماسه است. تغییر قابل توجه در این گمانه ضخیم شدن الگوهای بازتابی با افزایش عمق است که به افزایش رطوبت در لایه‌های زیرسطحی نسبت به لایه‌های سطحی مربوط است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه دوم با پروفیل راداری

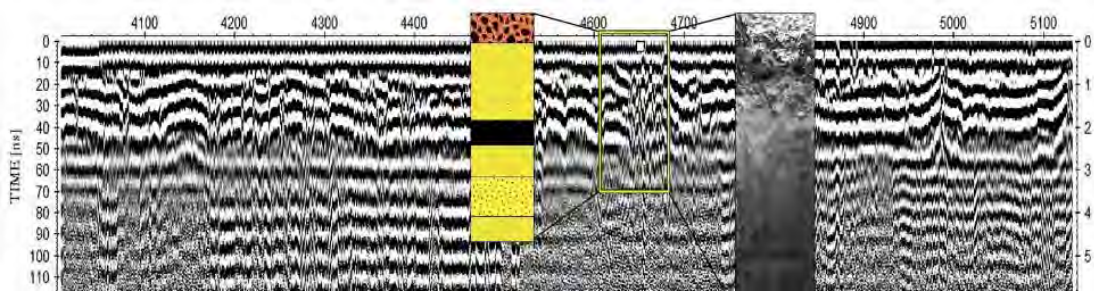
نمونه‌های رسوبی در گمانه ۳ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR انطباق داده شد. این گمانه در ۳۶۶۰ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. رسوبات این گمانه عمدتاً تناوبی از ماسه ریزدانه، ماسه گلی با کمی گراول، و گراول ماسه‌ای است. با توجه به تغییرات قابل مشاهده ۶ نمونه رسوبی از این گمانه برداشت شد. از سطح تا عمق ۴۵ سانتی‌متری از ماسه گراولی به رنگ خاکستری تیره، از عمق ۴۵ سانتی‌متری تا ۹۰ سانتی‌متری از گراول ماسه‌ای به رنگ زرد روشن، از عمق ۹۵ تا ۱۴۰ سانتی‌متری از ماسه گلی با کمی گراول به رنگ خاکستری روشن، از عمق ۱۴۰ سانتی‌متری تا ۱۸۰ سانتی‌متری از ماسه دانه‌ریز به رنگ قهوه‌ای، از عمق ۱۸۰ سانتی‌متری تا ۲۳۰ سانتی‌متری از ماسه ریزدانه به رنگ خاکستری، و از عمق ۲۳۰ سانتی‌متری تا ۲۵۰ سانتی‌متری از ماسه دانه‌ریز به رنگ قهوه‌ای تشکیل شده است. بیشتر از ۸۰ درصد نمونه‌های رسوبی این گمانه را ماسه تشکیل داده است. این گمانه از عمق به سطح یک توالی درشت‌شونده را نشان می‌دهد. الگوی راداری قابل توجه در این قسمت از پروفیل الگوی گسسته است که رسوبات آبرفتی قدیمی را نشان می‌دهد که با پروفیل‌های GPR همخوانی دارد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه سوم با پروفیل راداری

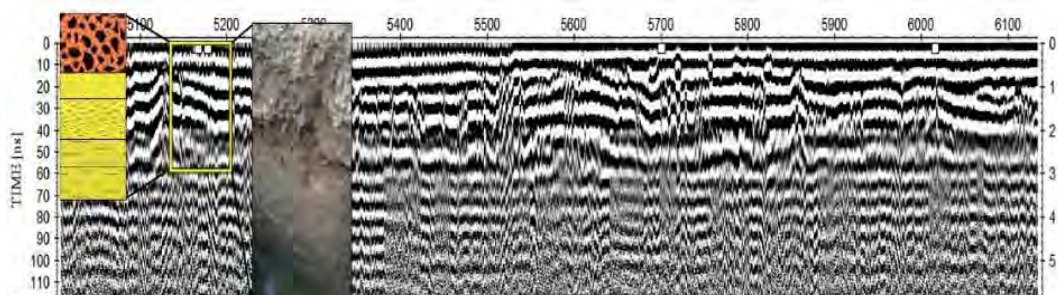
نمونه‌های رسوبی در گمانه ۴ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR انطباق داده شد. این گمانه در ۴۳۳۴ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. رسوبات این گمانه تناوبی از ماسه ریزدانه، ماسه درشت‌دانه، مواد آلی، و گراول ماسه‌ای است. با توجه به تغییرات قابل مشاهده تعداد ۷ نمونه رسوبی در این گمانه برای آنالیزهای رسوب‌شناسی برداشت شد. بیش از ۸۰ درصد رسوبات این گمانه در اندازه ماسه است. در این گمانه دو توالی درشت‌شونده به سمت بالا دیده می‌شود. رسوبات از سطح تا عمق ۴۵ سانتی‌متری از گراول ماسه‌ای به رنگ روشن، از عمق ۴۵ سانتی‌متری تا ۹۸

سانتی متری از ماسه ریز قهوه‌ای، از عمق ۹۸ سانتی متری تا ۱۳۸ سانتی متری ماسه ریز به رنگ قهوه‌ای تیره، از عمق ۱۳۸ سانتی متری تا ۱۶۸ سانتی متری از مواد آلی، از عمق ۱۶۸ سانتی متری تا ۲۰۲ سانتی متری از ماسه ریز قهوه‌ای تیره، از عمق ۲۰۲ سانتی متری تا ۲۵۰ سانتی متری از ماسه درشت‌دانه به رنگ خاکستری، و از عمق ۲۵۰ سانتی متری تا ۲۸۰ سانتی متری از ماسه ریزدانه به رنگ خاکستری تشکیل شده است. این تغییرات تقریباً در پروفیل‌های GPR هم قابل شناسایی است. اثر مواد آلی بر پروفیل‌های GPR همانند وجود آب باعث میرایی سیگنال‌ها و کاهش عمق نفوذ می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه چهارم با پروفیل راداری

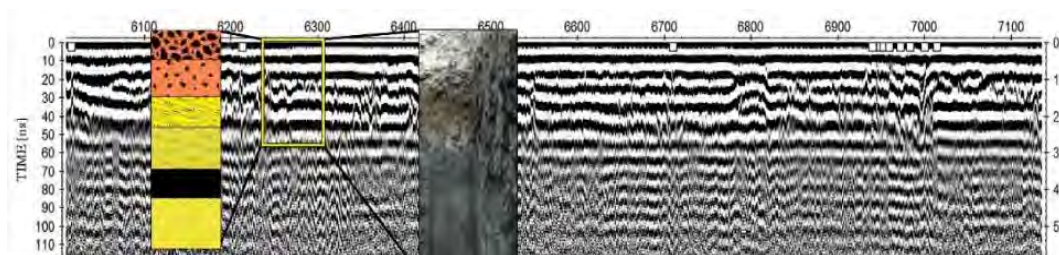
نمونه‌های رسوبی در گمانه ۵ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR انطباق داده شد. این گمانه در ۴۹۰۰ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. رسوبات این گمانه تناوبی از گراول ماسه‌ای، ماسه ریز سیلتی، ماسه ریز گلی، و ماسه بسیار ریز سیلتی است. در این گمانه ۵ نمونه رسوبی برداشت شد. بیش از ۸۰ درصد رسوبات این گمانه از ماسه ریزدانه تشکیل شده است. در این گمانه دو توالی درشت‌شونده به سمت بالا وجود دارد. رسوبات از سطح تا عمق ۶۰ سانتی متری از گراول ماسه‌ای به رنگ روشن، از عمق ۶۰ سانتی متری تا ۹۶ سانتی متری از ماسه ریز سیلتی قهوه‌ای رنگ، از عمق ۹۶ سانتی متری تا ۱۳۰ سانتی متری از ماسه ریز گلی به رنگ خاکستری روشن، از عمق ۱۳۰ سانتی متری تا ۱۶۸ سانتی متری از ماسه سیلتی خاکستری همراه فسیل دوکفه‌ای، از عمق ۱۶۸ سانتی متری تا ۲۰۰ سانتی متری از رسوبات ماسه بسیار ریز سیلتی به رنگ خاکستری تشکیل شده است. در پروفیل‌های GPR الگوی خاصی در محل این گمانه مشاهده نمی‌شود. در این گمانه به دلیل سطح ایستایی حفاری بیشتر از ۲ متر امکان‌پذیر نبود (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه پنجم با پروفیل راداری

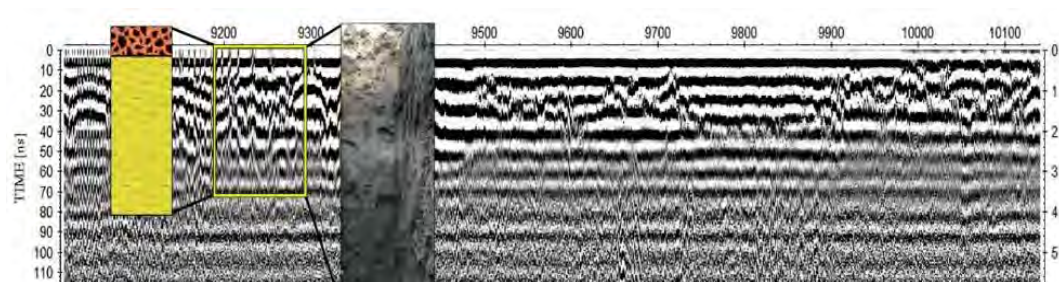


نمونه‌های رسوبی در گمانه ۶ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR انطباق داده شد. این گمانه در ۶۰۰۰ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. گمانه حفاری‌شده در این نقطه دارای تنوع رسوبی زیادی نسبت به سایر گمانه‌ها و عمق حفاری بیشتر نیز هست. در این گمانه با توجه به تغییرات قابل مشاهده ۶ نمونه رسوبی برداشت شد. رسوبات این گمانه تناوبی از ماسه ریز، مواد آلی، ماسه سیلتی، ماسه بسیار ریز گراولی، و گراول ماسه‌ای است. بیشتر از ۷۰ درصد این گمانه از ماسه تشکیل شده است. از سطح گمانه تا عمق ۴۰ سانتی‌متری از گراول ماسه‌ای به رنگ روشن، از عمق ۴۰ سانتی‌متری تا ۸۰ سانتی‌متری از ماسه بسیار ریز گراولی به رنگ قهوه‌ای روشن، از عمق ۸۰ سانتی‌متری تا ۱۲۵ سانتی‌متری از ماسه ریز سیلتی با طبقه‌بندی مورب به رنگ خاکستری تیره، از عمق ۱۲۵ سانتی‌متری تا ۱۷۶ سانتی‌متری از ماسه متوسط‌دانه سیلتی به رنگ قهوه‌ای روشن، از عمق ۱۷۶ سانتی‌متری تا ۲۱۰ سانتی‌متری از مواد آلی، و از عمق ۲۱۰ سانتی‌متری تا ۲۵۰ سانتی‌متری از ماسه ریزدانه به رنگ قهوه‌ای تشکیل شده است. در این گمانه دو توالی درشت‌شونده از عمق به سمت سطح گمانه دیده می‌شود. (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه ششم با پروفیل راداری

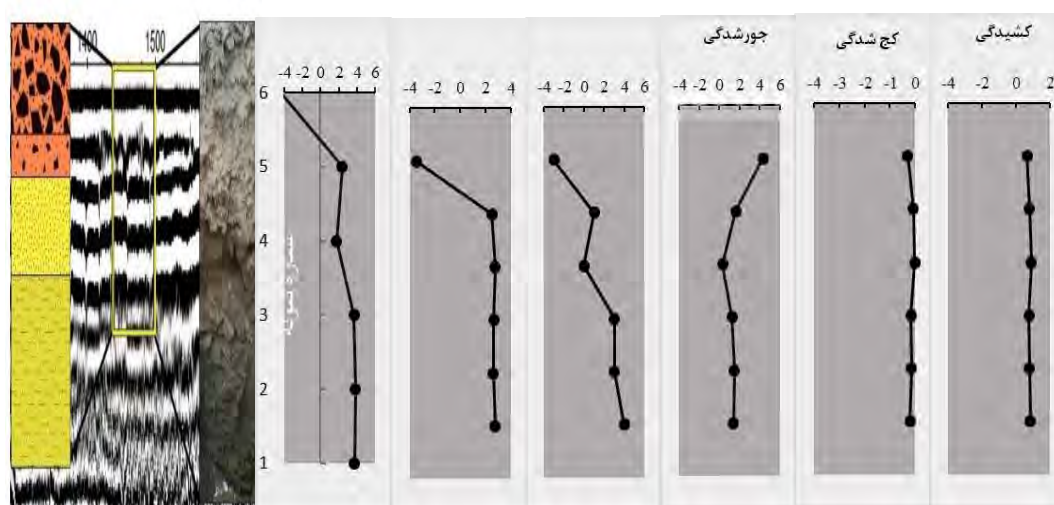
نمونه‌های رسوبی در گمانه ۷ با الگوهای راداری مشاهده‌شده در پروفیل GPR شماره ۲ انطباق داده شد. این گمانه در ۹۲۵۰ متری از نقطه شروع پروفیل راداری قرار دارد. عمده رسوبات این گمانه ماسه دانه‌ریز سیلتی است که تغییرات آن‌چنانی روی پروفیل راداری نشان نمی‌دهد (شکل ۱۶).



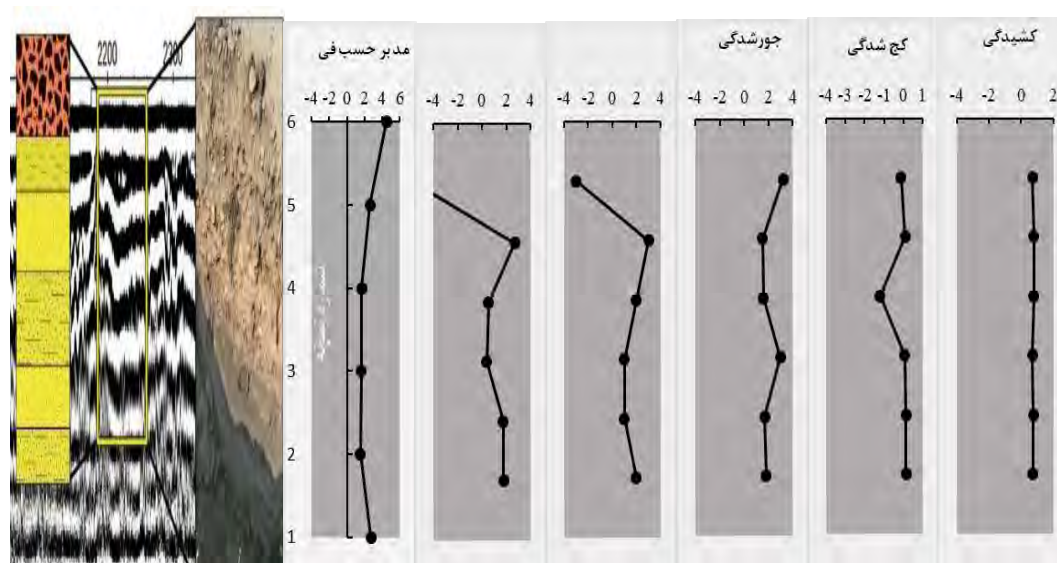
شکل ۱۶. تطابق داده‌های رسوب‌شناسی گمانه اول با پروفیل راداری

در نهایت می‌توان همه نتایج رسوب‌شناسی و راداری را در تصاویری ترکیبی آورد تا بتوان مقایسه‌ای بین نتایج دو روش انجام داد (مثلاً شکل‌های ۱۷ و ۱۸ برای دو گمانه ۱ و ۲). در گمانه اول به جز دو پارامتر کج‌شدگی و کشیدگی، که تغییرات

مهمی را از سطح تا عمق نشان نمی دهند، سایر پارامترها (مد، میانه، میانگین، جورشدگی که همگی معرفی از اندازه ذرات اند) یک تغییر مهم را در نزدیک سطح نشان می دهند. تقریباً با تغییر لایه رسوبی یک تغییر هم در رخساره راداری دیده می شود. اما با شروع لایه سوم راداری نمی توان به خوبی تغییری در پارامترهای رسوبی استنباط کرد. افزایش عمق و محدودیت های امواج الکترومغناطیس می تواند دلیل این وضعیت باشد. در گمانه دوم نیز این وضعیت تا حدود زیادی حکم فرماست و پارامترهای آماری لایه سوم رسوبی در رخساره راداری نیز دیده می شود. بنابراین، می توان گفت رخساره های راداری با رعایت محدودیت عمق، اندازه ذرات، میزان رطوبت و مواد آلی و تبخیری می توانند به ویژه در عمق های کم و نزدیک سطح معرف خوبی برای انواع رسوبات باشند. این نکته در مطالعات زیرساخت شهری حائز اهمیت است.



شکل ۱۷. نمایش و مقایسه پارامترهای آماری (بر حسب فی) با پروفیل راداری و گمانه حفاری شده شماره ۱



شکل ۱۸. نمایش و مقایسه پارامترهای آماری با پروفیل راداری و گمانه حفاری شده شماره ۲

## نتیجه

در مطالعات زمین‌شناسی زیرسطحی، با هدف شناسایی لایه‌ها و رخساره‌ها و بازسازی محیط دیرینه، روش‌های متنوع مستقیم (نمونه‌برداری از ترانسه‌ها و گمانه‌ها) و غیرمستقیم استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی (مانند رادار نفوذی به زمین) وجود دارد. روش رادار نفوذی به زمین روش ژئوفیزیکی غیرمخرب، ارزان، سریع، و دارای محدودیت کم است که در این تحقیق به کار گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد محیط‌های مرطوب، دانه‌ریز، و دارای مواد آلی فراوان از محدودیت‌های روش رادار است و باعث از بین رفتن موج می‌شود. همچنین در محیط‌های شهری و معابر پرگذر عبور و مرور وسایل نقلیه و وجود دکل‌ها و تیرهای برق و ... بر پروفیل‌های راداری اثر می‌گذارد و باعث ناخوانا شدن پروفیل راداری می‌شود. در منطقه مورد مطالعه عمق نفوذ مؤثر و مفید امواج بیشتر از ۳ متر نیست. در این تحقیق بر اساس طبقه‌بندی‌های معتبر علمی ۵ رخساره راداری و ۹ رخساره رسوبی مربوط به محیط‌های رسوبی مختلف شناسایی شدند. رخساره‌های راداری شناسایی شده عبارت‌اند از رخساره راداری اول: خطوط راداری به صورت گسسته و غیرموازی مقعر محدب (۱)؛ رخساره راداری دوم: خطوط راداری به صورت منحنی‌های پیوسته موازی (۲)؛ رخساره راداری سوم: خطوط راداری با شیب‌های متفاوت به صورت گسسته (۳)؛ رخساره راداری چهارم: خطوط راداری به صورت ناپیوسته موازی با شیب کم (۴)؛ رخساره راداری پنجم: خطوط راداری ناپیوسته موازی با شیب کم و میرایی شدید (۵). همچنین ۹ رخساره‌های رسوبی شناسایی شده در این رسوبات (به ترتیب فراوانی) ماسه بسیار ریز سیلتی، ماسه ریز، گراول ماسه‌ای، ماسه ریز گراولی، مواد آلی، ماسه درشت سیلتی، ماسه درشت، ماسه ریز گراولی، و ماسه گلی با کمی گراول است. این رخساره‌ها نشان‌دهنده محیط‌های کانالی قدیمی و رسوبات دشت سیلابی است و به احتمال زیاد از تشکیل‌دهنده‌های کانال قدیمی رودخانه سفیدرود است که کانال آن به سمت شرق تغییر مسیر داده است. بیشتر گمانه‌های حفرشده رسوبات از پایین به سمت بالا یک توالی ریزشونده و سپس یک توالی درشت‌شونده به سمت بالا دارند که نشان‌دهنده نوسانات انرژی محیط در طول زمان است. نتایج نشان داد رخساره‌های راداری با رعایت محدودیت عمق، اندازه ذرات، میزان رطوبت، و مواد آلی و تبخیری می‌توانند به‌ویژه در عمق‌های کم و نزدیک سطح معرف خوبی برای انواع رسوبات باشند. با این تحقیق و تطابق رخساره‌های رسوبی و راداری، توانایی دو روش در تفسیر دیگری نیز مشخص شد. این‌گونه تطابق‌ها می‌تواند در مناطق دیگر هم با اطمینان زیاد به کار گرفته شود.

## منابع

- آقاباتی، ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی/ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- احراری رودی، م.، معتمد، ا.، محبوبی، ا.، لک، ر.، موسوی حرمی، ر.، (۱۳۹۰). بررسی ساختارهای زیرسطحی کم‌عمق در خورهای پارک و شور در شمال غرب دریای عمان با روش رادار نفوذی به زمین (GPR). پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- امینی، ع. (۱۳۹۰). مبانی چینه‌نگاری سکانسی، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- خبازنیا، ع. ر. و صادقی، ا. (۲۰۰۴). گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- خدابخش س.، باقری ح.، مهدی نسب ع. (۱۳۹۴)، رخساره های رسوبی و رخساره های رادار دونهای ساحلی شرق بابلسر (جنوب دریای خزر)، رسوب شناسی کاربردی، دوره ۳، شماره ۵، ص ۴۲ تا ۴۹.
- کامران پور، ع. (۱۳۸۲). «مشخصات رسوب شناسی نهشته های رسوبی سفیدرود از سد منجیل تا دلتای سفیدرود با نگرشی بر آلودگی های زیست محیطی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تهران.
- موسوی حرمی، ر. (۱۳۸۱). رسوب شناسی و سنگ شناسی رسوبی، انتشارات آستان قدس رضوی.
- نبوی، م. ح. (۱۳۵۵). دیباچه ای بر زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.
- زمین شناسی مناطق ساحلی دریای خزر (برگرفته از مطالعات طرح مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی ایران (ICZM)، (تدوین و پژوهش)، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی.
- سرور، ج. (۱۳۸۳). «تغییر مسیر رودخانه سفیدرود بر روی دلتای آن (از سال ۱۳۸۲ تا سال ۱۳۸۷)»، سرزمین، س ۵، ش ۲۰.
- Aghanabati, A., (2004), "Geology of Iran", GSI publication, 670p.
- Ahrari-roudi, M., Motamed, A., Mahboubi, A., Lak, R., Mousavi-harami, R., (2011), "Investigation of shallow subsurface structures in Park and Shour estuaries in NW of Oman Sea using GPR", 15<sup>th</sup> conference of Geological Association of Iran.
- Amini, A., (2011), "Principals of sequence stratigraphy", Tehran University pub., 450p.
- Alavi, M. (1991). "Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran". *Geological Society of America Bulletin*, 103(8), pp. 983-992.
- Annan, A. P. & Davis, J. L. (1992). "Design and Development of a Digital Ground Penetrating Radar System. Ground Penetrating Radar", *Geological Survey of Canada Special Paper*, 90(4), pp. 15-23.
- Annan, A. P. (2005). "Ground-Penetrating Radar. In *Near-Surface Geophysics*" (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.
- Berberian, M. (1983). "The Southern Caspian: A Compressional Depression Floored by A Trapped, Modified Oceanic Crust". *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(2), pp. 163-183.
- Beres, M. & Haeni, F. P. (1991). "Application of Ground Penetrating Radar Methods in Hydrogeology Studies". *Ground Water*, 29(3), pp. 375-386.
- Berton, F., Guedes, C. C. F., Vesely, F. F., Souza, M. C., Angulo, R. J., Rosa, M. L. C. C., & Barboza, E. G. (2019). "Quaternary coastal plains as reservoir analogues: Wave-dominated sand-body heterogeneity from outcrop and ground-penetrating radar, central Santos Basin, southeast Brazil". *Sedimentary Geology*, 379, pp. 97-113. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.11.008.
- Botha, G. A., Bristow, C. S., Porat, N., Duller, G., Armitage, S. J., Roberts, H. M., Clarke, B. M., Kota, M. W., & Schoeman, P. (2003). "Evidence for Dune Reactivation from GPR Profiles on the Maputaland Coastal Plain, South Africa". *Geological Society, London, Special Publications*, 211(1), pp. 29-46.
- Bristow, C. S. & Jol, H. M. (2003). "An Introduction to Ground Penetrating Radar (GPR) In Sediments". *Geological Society, London, Special Publications*, 211(1), pp. 1-7.
- Bui En, Mazullo, J. & Wilding, L. p. (1990). "Using Quartz Grain Size and Shape Analysis to Distinguish Between Aeolian and Fluvial Deposits in the Dallol Bosso of Niger (West Africa)". *Earth Surface Processes and Landforms* 14: pp. 157-166.
- Cassidy, N. J. & Jol, H. M. (2009). "Electrical and Magnetic Properties of Rocks", *Soils and Fluids* (Vol. 2, pp. 41-67). Chapter.
- Clark, G., Davies, R. G, Hamzhepour, B., & Jones, C. R. (1975). "Explanatory Text of the Bandar-E-Pahlavi Quadrangle Map", 1:250000 *Geology Survey of Iran*, 3d.
- Daniels, D. J. (2004). "Ground Penetrating Radar", 2nd Edition, *Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series* 15, Institute of Electrical Engineers, London, Uk, 47(6), pp. 851-485.

- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957). "Brazos River bar [Texas]; A Study in the Significance of Grain Size Parameters". *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), pp. 3-26.
- Friedman, G. M. (1979). "Differences in Size Distributions of Populations of Particles among Sands of Various Origins": Addendum to Ias Presidential Address. *Sedimentology*, 26(6), pp. 859-862.
- Gao, C., Boreham, S., Preece, R. C., Gibbard, P. L., & Briant, R. M. (2007). "Fluvial response to rapid climate change during the Devensian (Weichselian) Lateglacial in the River Great Ouse, southern England, UK". *Sedimentary Geology*, 202(1-2), pp. 193-210.
- Kamranpour, A., (2003), "Sedimentological properties of Sefidroud alluviums from Manjil dam to Sefidroud delta with emphasis on environmental pollutions", MSc thesis, Tehran University, 156p.
- Khabaznia, A.R., Sadeghi, A., (2004), "GPR studies in Guilan", *GSI report*, 550p.
- Khodabakhsh, S., Bagheri, H., Mahdinasab, A., (2015), "Sedimentary and radar facies of beach dunes in east of Babolsar (south of Caspian Sea)", *Applied sedimentology*, V.3, N.5, P.229-42.
- Leandro, C. G., Barboza, E. G., Caron, F., & de Jesus, F. A. (2019). "GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil". *Journal of Applied Geophysics*. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.002.
- Morey, R. M. (1974). "Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar". In *Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*: 48(5), pp. 213-232.
- Mousavi-harami, R., "Sedimentology", Astan-e-ghods pub., 460p.
- Nabavi, M.H., 1976, "An introduction of geology of Iran", GSI pub., 550p.
- Neal, A. (2004). "Ground-Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress". *Earth-Science Reviews*, 66(3), pp. 261-330.
- Reading, H. G. (1996). "Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy". 3rd. Edition. Blackwell Science. Oxford.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 33 (6) pp. 836-123.
- Robinson, M., Bristow, C., Mckinley, J., & Ruffell, A. (2013). "Ground Penetrating Radar. Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic and Environmental Research", Gilbert, B. Editor, Open File, 3731, pp. 69-102.
- Sambrook Smith, G. H., Ashworth, P. J., Best, J. L., Woodward, J., Simpson, C. J. (2006b). "The Sedimentology and Alluvial Architecture of the Sandy Braided South Saskatchewan River, Canada". *Sedimentology* 53, pp. 413-434.
- Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Bristow, C. S., Petts, G. E. (2006a). "Braided Rivers: Where Have We Come in 10 Years? Progress and Future Needs". In: Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Bristow, C. S., Petts, G. E. (Eds.), *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*, Ias Special Publication 36, Blackwell Publishing, 1-10.
- Sarvar, J., 2004, "The change of Sefidroud river pathway on its delta: during 2003-2008", *Sarzamin Journal*, V.5, N20.
- Shafri, H. Z. M., Abdullah, R. R., Roslee, M., & Muniandy, R. (2008)." Optimization of Ground Penetrating Radar (GPR) Mixture Model in Road Pavement Density Data Analysis". In *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Igarss 2008. Ieee International (3), pp. Iii-1326. Ieee.
- Shan, X., Yu, X., Clift, P. D., Tan, C., Jin, L., Li, M., & Li, W. (2015). "The ground penetrating radar facies and architecture of a Paleo-spit from Huangqihai Lake, North China: implications for genesis and evolution". *Sedimentary Geology*, 323, pp.1-14.
- Sharma, P., Heggy, E., & Farr, T. G. (2018). "Exploring morphology, layering and formation history of linear terrestrial dunes from radar observations: Implications for Titan". *Remote Sensing of Environment*, 204, pp. 296-307.

- Smith, D. G. & Jol, H. M. (1992). "Ground-Penetrating Radar Investigation of a Lake Bonneville Delta, Provo Level, Brigham City", Utah. *Geology*, 20(12), pp. 1083-1086.
- Stern, W. (1929). "An electromagnetic experiment of alluvial sediments", In German language, Akad. Verlag-Ges.
- Stocklin, J. (1968). "Structural History and Tectonics of Iran: A Review". *Aapg Bulletin*, 52(7), pp. 1229-1258.
- Tamura, L. N., Almeida, R. P. D., Taioli, F., Marconato, A., & Janikian, L. (2016). "Ground Penetrating Radar investigation of depositional architecture: The São Sebastião and Marizal formations in the Cretaceous Tucano Basin (Northeastern Brazil)". *Brazilian Journal of Geology*, 46(1), pp. 15-27.
- Van Dam, R. L. & Schlager, W. (2000). "Identifying Causes of Ground Penetrating Radar Reflections Using Time Domain Reflectometry and Sedimentological Analyses. *Sedimentology*", 47(2), pp. 435-449.
- Yilmaz, O. (1987). "Seismic Data Processing: Society of Exploration Geophysicists", Tulsa, Oklahoma. Google Scholar, report1097321.