

پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR)، به منظور تعیین ضخامت و

توپوگرافی بستر یخچال علم کوه

سعید پرنو^{۱*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲، علیرضا عرب امیری^۲ و نعمت‌اله کریمی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. دانشیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. دکتری، مؤسسه تحقیقات آب، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، وزارت نیرو، تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۵/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

تعیین ضخامت یخچال‌های کوهستانی مانند علم کوه باتوجه به شرایط آب‌وهوایی بسیار سرد، ارتفاع زیاد یخچال، خطر سقوط بهمین و توپوگرافی زیاد، کار بسیار دشواری است. در این پژوهش به دلیل شفاف‌بودن یخ برای امواج الکترومغناطیسی و غیرمخرب، سریع و دقیق‌بودن روش رادار نفوذی به زمین (GPR)، برای تعیین ضخامت و توپوگرافی بستر یخچال علم کوه از این روش استفاده شده است. داده‌های GPR با استفاده از آنتن ۲۵ مگاهرتز به روش دور افت مشترک (common offset mode) و با ۶ متر فاصله بین فرستنده و گیرنده برداشت شده است. تقریباً کل یخچال‌های غربی منطقه مورد مطالعه (یخچال‌های علم‌چال، تخت‌چال و تخت سلیمان)، توسط روش GPR برداشت شده است. جهت اختصار فقط داده‌های سه پروفیل (a، b و c) واقع در یخچال علم‌چال، پردازش و تفسیر شده‌اند. بعد از پردازش‌های مناسب، بازتاب‌های بستر یخچال آشکارسازی شده و با قراردادن سرعت مناسب موج الکترومغناطیسی در یخ (۰/۱۶ متر بر نانوثانیه)، ضخامت متغیر ۵۰ تا ۹۴ متر برای لایه یخ در زیر پروفیل‌های مورد بررسی، تخمین زده شده است. نشانگرهای دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای برای آشکارسازی و تفسیر بهتر لایه‌های زیر سطحی در مقاطع GPR، استخراج شده است. نشانگر دامنه لحظه‌ای، بازتاب‌های بستر یخچال، قلوه‌سنگ‌های یخچالی و واریزه‌های داخل یخ را به خوبی تفکیک کرده است. در نهایت در مقاطع عمقی پروفیل‌های مورد بررسی، مشاهده شد که توپوگرافی بستر یخچال، کمی نسبتاً دقیقی از توپوگرافی سطح یخچال است.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی بستر یخچال، ضخامت یخ، یخچال علم کوه، رادار نفوذی به زمین (GPR).

۱. مقدمه

یخچال‌های کوهستانی توسط زمین‌های کشاورزی احاطه شده‌اند و آبیاری در طول تابستان و اواخر بهار به آب حاصل از ذوب شدن یخچال بستگی دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. ضخامت یخچال یکی از پارامترهای مهم برای پیش‌بینی مقدار آب حاصل از ذوب یخچال و تغییرات یخچال در طول سالیان است. چنین اطلاعاتی با توجه به شرایط آب‌وهوایی بسیار سرد، ارتفاع زیاد یخچال، خطر سقوط بهمین و همچنین باتوجه به زمان و نیروی کاری زیادی که در بررسی‌های ژئوفیزیکی لازم است، به‌طور کلی کمیاب هستند. در برخی مطالعات (هاگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ بیندر و همکاران، ۲۰۰۹) ضخامت یخچال را از توپوگرافی

یخچال‌ها به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین، ۶۸/۷ درصد از کل آب‌های شیرین جهان را در خود ذخیره کرده‌اند (مویا و همکاران، ۲۰۱۳). در این میان یخچال‌های کوهستانی به‌عنوان شاخص‌های کلیدی برای تغییرات آب‌وهوا در طول سالیان مختلف، مکان‌های مناسب برای جذب گردشگران و از منابع مهم آب شیرین در دوره‌های زمانی بلندمدت و کوتاه‌مدت به‌شمار می‌روند (ادر و همکاران، ۲۰۰۸؛ هاگ و همکاران، ۲۰۱۲). برای چرخه آب کلاردشت، یخچال علم کوه همچون یک سد در تأمین آب رودخانه‌های این منطقه، خصوصاً در دوره‌های خشکسالی و تابستان نقش مهمی ایفا می‌کند. این موضوع زمانی که

مبنی بر داده‌های نامعتبر رادار ارتفاع‌سنج هواپیماها در هنگام عبور از روی یخچال‌های نواحی قطب جنوب (قبل از جنگ جهانی دوم)، برمی‌گردد. بر مبنای همین گزارش‌ها، در سال ۱۹۵۷ یک رادار ارتفاع‌سنج هواپیمای نیروی هوایی آمریکا، موفق به تعیین ضخامت یخ در نواحی قطب جنوب شد (پلیکا و گارت، ۲۰۱۰). امروزه با استفاده از این تکنیک، ضخامت، حجم و توپوگرافی بستر یخچال‌های کوهستانی و قاره‌ای در نقاط مختلف جهان به‌خوبی آشکارسازی شده است (بیندر و همکاران، ۲۰۰۹؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۷؛ واتسون و همکاران، ۲۰۰۸). در این پژوهش با استفاده از روش GPR برای اولین بار در ایران سعی شده که ضخامت و توپوگرافی بستر یخچال علم‌کوه با اعمال پردازش‌های مناسب و تفسیرهای دقیق بررسی شود. با توجه به مشکلات و شرایط دشوار مناطق یخچالی، این مطالعات با برنامه‌ریزی دقیق و تلاش‌های مستمر مسئولان و کارشناسان مؤسسه تحقیقات آب انجام گرفته است.

۲. روش تحقیق

انواع مختلف سیستم‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) شامل آنتن‌های فرستنده و گیرنده (پوششی و غیرپوششی)، واحد کنترل، کابل اتصال آنتن‌های فرستنده و گیرنده، سیستم ثبت و نمایش همزمان داده‌های برداشتی هستند. در شکل ۱ قسمت‌های مختلف یک سیستم رادار نفوذی به زمین حین برداشت روی یخچال علم‌کوه نشان داده شده است.

سطح آن براساس اصول (مکانیسم) حرکت یخچال، تخمین می‌زنند. این تخمین با در نظر گرفتن اینکه سطح یخچال کمی دقیقی از بستر یخچال است، به دست می‌آید. در این مطالعات ضخامت یخچال طبق رابطه (۱) تخمین زده می‌شود (هاگک و همکاران، ۲۰۱۲):

$$h = t / (\rho \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot f \quad (1)$$

که در آن h ، ضخامت یخ (متر)؛ t ، فشار برشی کف یخچال (کیلو پاسکال)؛ ρ ، چگالی یخ (۹۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب)؛ g ، شتاب گرانش (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)؛ α ، شیب سطح یخچال (درجه) و f ، فاکتور شکل یخچال است. همان‌طور که در این فرمول دیده می‌شود، در قسمت‌هایی که شیب سطح یخچال زیاد است (فشار برشی کم)، حرکت یخچال سریع و ضخامت یخ کم است و در بخش‌های با سطح صاف و هموار ضخامت یخچال بیشتر است. برای تخمین دقیق ضخامت یخ از روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی همچون لرزه‌نگاری (بوس و همکاران، ۱۹۷۱؛ داوید و همکاران، ۲۰۰۷)، گرانی‌سنجی (کروسلی و کلارک، ۱۹۷۰)، مقاومت ویژه الکتریکی (آنجلوپولوس و همکاران، ۲۰۱۳) و مغناطیس‌سنجی (کنت و همکاران، ۱۹۶۶) در نقاط مختلف جهان استفاده شده است. با وجود این روش رادار نفوذی به زمین (GPR) تکنیکی نوین، غیرمخرب، سریع و دقیق است که به‌طور گسترده برای یخچال‌ها استفاده می‌شود. ایده اصلی استفاده از رادار نفوذی به زمین به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی، به گزارش خلبان‌های آمریکایی



شکل ۱. تصویری از برداشت داده‌های GPR روی یخچال علم‌کوه و نمایش قسمت‌های مختلف سیستم GPR

جدول ۱. خصوصیات الکترومغناطیسی مواد معمول (إدر و همکاران، ۲۰۰۸؛ برنت و همکاران، ۲۰۰۷)

مواد معمول	گذردهی نسبی	سرعت موج الکترومغناطیسی (m/ns)	رسانندگی الکتریکی (ms/m)
هوا	۱	۰/۳	۰
یخ یخچالی	۴-۳	۰/۱۷۰-۰/۱۶۷	۰/۰۱
آب شیرین	۸۰	۰/۰۳۳	۰/۵
گرانیت	۶-۴	۰/۱۳	۱-۰/۰۱
برف خشک	۲-۱/۵	۰/۲۳	-

قرار می‌گیرد (إدر و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین بررسی فاکتورهای کلیدی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی برای طراحی برداشت داده‌های GPR امری ضروری است. تضعیف موج الکترومغناطیسی توسط دو پارامتر فرکانس موج الکترومغناطیسی و رسانندگی محیط انتقال‌دهنده موج کنترل می‌شود، به طوری که با افزایش فرکانس و رسانندگی، تضعیف موج الکترومغناطیسی نیز بیشتر می‌شود. تضعیف خیلی کم امواج الکترومغناطیسی در برف خشک و یخ به دلیل رسانندگی کم و نبود مواد دی‌الکتریک یا مغناطیسی باعث شده است که این محیط‌ها بهترین مکان‌ها برای انتقال امواج رادار با فرکانس‌های بیشتر از ۱ MHz باشند (دانیلز، ۲۰۰۴). در نواحی قطب جنوب با استفاده از آنتن‌های ۱۵۰-۵۰ MHz به عمق ۳ تا ۴ کیلومتر دست یافته‌اند (جول، ۲۰۰۹). بررسی تئوری تفکیک‌پذیری به منظور تخمین عملکرد GPR در تفکیک لایه‌ها بسیار مفید است. بهترین تفکیک‌پذیری عمودی در بررسی‌های GPR، ۱/۴ تا ۱/۲ طول موج غالب رادار است (بیندر و همکاران، ۲۰۰۹). طول موج به صورت نسبت سرعت به فرکانس غالب موج الکترومغناطیسی با رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

که در آن، λ طول موج، v سرعت امواج الکترومغناطیسی در محیط و f فرکانس غالب موج الکترومغناطیسی است که بیشترین تمرکز انرژی (بیشترین تأثیر بر داده‌ها) در آن وجود دارد. جدول ۲ محدوده تفکیک‌پذیری نظری عمودی مواد مختلف در یخچال علم کوه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس و رسانندگی، قدرت تفکیک‌پذیری نیز افزایش می‌یابد.

اساس GPR بر مبنای اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت امواج الکترومغناطیسی در محیط انتقال‌دهنده موج و تبدیل مقطع زمانی به مقطع عمقی طبق رابطه (۲) است (پالی، ۲۰۰۳):

$$D = \frac{V \cdot t}{2} \quad (2)$$

که در آن، D عمق، t زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی و V که سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی در محیط انتشار موج است، تابعی از گذردهی الکتریکی نسبی (گذردهی الکتریکی محیط انتقال‌دهنده موج به گذردهی الکتریکی خلأ) است. در یک محیط غیررسانا مانند سیمان خشک و یخ سرعت موج الکترومغناطیسی به صورت رابطه (۳) است (پالی، ۲۰۰۳):

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

که در آن، c سرعت نور در خلأ (3×10^8 متر بر ثانیه) و ϵ_r و μ به ترتیب گذردهی الکتریکی محیط نسبت به خلأ و تراوایی مغناطیسی است. گذردهی الکتریکی مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده انتشار امواج الکترومغناطیسی به صورت نسبت تعداد گشتاورهای دوقطبی القاشده در واحد حجم ماده، به میدان الکتریکی خارجی تعریف می‌شود (تلفورد و همکاران، ۲۰۰۴). گذردهی دی‌الکتریک یخ به حجم آب و واریزه‌های موجود در یخ بستگی دارد، به طوری که با افزایش مقدار واریزه و آب در یخ، گذردهی الکتریکی افزایش می‌یابد. در جدول ۱ خصوصیات الکترومغناطیسی برخی از مواد مورد بررسی در این پژوهش، ذکر شده است.

یکی از فاکتورهای مهم در بررسی‌های GPR عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی در محیط انتقال‌دهنده موج است. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی به شدت تحت تأثیر اتلاف سیگنال به دلیل جذب انرژی توسط محیط انتقال‌دهنده موج

جدول ۲. محدوده تئوری تفکیک‌پذیری عمودی برای محیط‌های مختلف با فرکانس‌های گوناگون

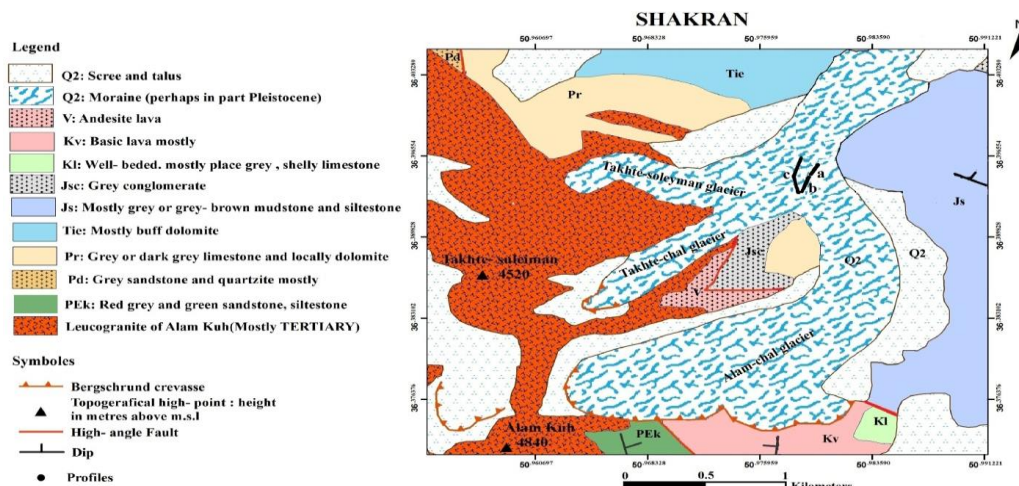
محیط انتقال‌دهنده موج الکترومغناطیسی				فرکانس آنتن (MHz)
برف (خشک)	گرانیت	یخ	آب	
۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۱۶۷	۰/۰۳	سرعت ($m\ ns^{-1}$)
۲/۳-۴/۶	۱/۳-۲/۶	۱/۶۷-۳/۳۴	۰/۳-۰/۶	۲۵
۰/۵۷۵-۱۵/۱	۰/۶۵-۰/۳۲۵	۰/۴-۰/۸	۰/۰۱۵-۰/۰۳	۱۰۰
۰/۱۱۵-۰/۲۳	۰/۰۶۵-۰/۱۳	۰/۲-۰/۴	۰/۰۱۵-۰/۰۳	۵۰۰

۳. منطقه مورد مطالعه

درج شده است. محدوده مورد مطالعه روی رسوبات یخچالی کواترنری (مورن) واقع شده است. این رسوبات به وسیله سازندهای کهر، روته، الیکا و شمشک در برگرفته شده است. واحدهای زمین‌شناسی این ناحیه عمدتاً از گرانیت دانه‌ریز تشکیل شده است (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). همانند دیگر یخچال‌ها بارش در این منطقه به صورت برف است. ریزش برف در این منطقه حدود ۴۵۲ سانتی‌متر در سال است که در طول ۶۵ روز در سال اتفاق می‌افتد (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲).

در شکل ۲ یخچال‌های مهم منطقه تخت سلیمان نسبت به قله علم‌کوه به سه یخچال عمده علم‌چال، تخت‌چال و تخت سلیمان تقسیم‌بندی شده است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، یخچال علم‌چال با مساحت ۴/۸ کیلومتر مربع با حداکثر طول از حد بالا تا پیشانی ۴/۵ کیلومتر و حداکثر عرض ۲/۲۵ کیلومتر است. ارتفاع خط‌برف دائمی در این یخچال در حدود ۴۰۰۰ تا ۴۱۵۰ متر است (وزیری، ۱۳۸۲). ضخامت مورن‌های سطحی از ۰/۵ متر تا حدود ۱/۵ متر (در قسمت‌های بالای یخچال) متغیر است، اما در قسمت‌های پایین‌تر به‌ویژه در اطراف سرچال، تشکیلات سطحی عمدتاً به شکل خاک درشت‌دانه و سبزرنگ دیده می‌شود (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). لازم به ذکر است که در فصل برداشت داده‌ها (خرداد ۱۳۹۱)، سطح منطقه توسط برف با ضخامت متغیر (حدود ۰/۵ - ۱ متر) پوشیده شده بود.

قله علم‌کوه با ارتفاع ۴۸۳۵ متر از سطح دریا در منطقه‌ای به نام تخت سلیمان با طول شرقی $50^{\circ}90'$ تا $51^{\circ}00'$ و عرض شمالی $36^{\circ}40'$ تا $36^{\circ}34'$ ، دومین قله مرتفع ایران بعد از دماوند محسوب می‌گردد (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). شکل پستی و بلندی‌های این ناحیه به نحوی است که تعداد ۴۵ قله (قله‌های شناخته‌شده و بنام) با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر و تعداد ۱۰۰ قله با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا در این ناحیه وجود دارد (وزیری، ۱۳۸۲). پستی و بلندی‌های فراوان و به‌ویژه رشته‌کوه مجزای هفت‌خوان با هفت قله با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر از سطح دریا و همچنین برودت نسبتاً زیاد به علت اغتشاشات جوی و توفان‌های با سرعت زیاد، سبب شده است که چند یخچال نسبتاً مهم (البته مهم به لحاظ قرارگرفتن در منطقه‌ای نیمه‌خشک مانند ایران) به وجود آید (وزیری، ۱۳۸۲). علم‌کوه بزرگ‌ترین و مهم‌ترین یخچال موجود در ایران است که در دوره کواترنری به وجود آمده و آب رودخانه‌های بربر و خرم‌دشت را در مناطق زیردست تأمین می‌کند (وزیری، ۱۳۸۲). ارتفاع این یخچال حدود ۳۱۹۷ تا ۴۸۳۵ متر بالای سطح دریاست. در شکل ۲ بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شکران که در آن پروفیل‌های برداشتی نیز مشخص شده، آورده شده است. به‌منظور پرهیز از افزایش حجم مطالب، تنها به چند نکته مهم درباره زمین‌شناسی منطقه بسنده می‌کنیم. اطلاعات بیشتر در مورد زمین‌شناسی منطقه، در نقشه زمین‌شناسی شکران



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه برداشت، موقعیت پروفیل‌های برداشتی GPR و سه یخچال مهم منطقه تخت سلیمان (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شکران،

(۱۹۷۷)

۴. برداشت داده‌های GPR

به دلیل وابستگی برخی از پارامترها مانند عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، نوع آرایش برداشت داده‌ها و فرکانس مرکزی آنتن فرستنده، نمی‌توان بعد از برداشت داده‌ها با اعمال پردازش این پارامترها را تقویت کرد؛ بنابراین قبل از برداشت داده‌ها، باید با توجه به زمین‌شناسی منطقه و پارامترهای فیزیکی و هندسی هدف مورد مطالعه، پارامترهای برداشت را تعریف کرد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، با افزایش رسانندگی و فرکانس، عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین باید بین عمق نفوذ مورد نظر و تفکیک‌پذیری مورد نیاز، توازن ایجاد کرد. بدین دلیل پیشنهاد می‌شود که از فرکانس‌های پایین (۳۰-۵ MHz) برای نمایش توپوگرافی بستر یخچال، از فرکانس‌های میانی (۳۷۰-۳۲۰ MHz) برای نمایش ساختارهای داخلی و از فرکانس‌های بالا (۱۰۰۰ MHz-۶۰۰) به منظور آشکارسازی ضخامت برف استفاده شود. بنابراین فرکانس آنتن، ثابت دی‌الکتریک محیط، عمق تجسس مورد نظر، فاصله بین فرستنده و گیرنده و فاصله بین ردها، پارامترهای اساسی در بررسی‌های GPR هستند. بدین دلیل در این پژوهش داده‌های GPR با استفاده از دستگاه Mala GeoScience با آنتن مرکزی ۲۵ مگاهرتز با هدف تعیین ضخامت و نمایش توپوگرافی بستر یخچال علم‌کوه برداشت شده‌اند. این سیستم یک رادار پالسی (Pulseradar) است که از آنتن‌های بدون پوشش (unshielded) بهره می‌گیرد و داده‌ها را به روش دور افت مشترک (mode common offset) برداشت می‌کند (شکل ۱). در این پژوهش فاصله بین فرستنده و گیرنده، ۶ متر (ثابت) و فاصله بین دو رد متوالی ۰/۲۹۹۸۹۲ متر است. تقریباً کل منطقه یخچال شمالی و قسمت‌هایی از یخچال باختری توسط سیستم رادار برداشت شده است. طول کل پروفیل‌های برداشتی در این پژوهش ۲۳ کیلومتر است که ۱۸ کیلومتر پروفیل‌های برداشتی قابل تفسیر بوده است. در این پژوهش جهت اختصار فقط داده‌های سه پروفیل a، b و c پردازش و تفسیر شده‌اند. با توجه به ناهموار بودن منطقه مورد مطالعه، با استفاده از GPS نصب شده بر روی دستگاه GPR، به ازای هر رد برداشتی یک نقطه GPS نیز برداشت شده است. این نقاط به صورت خودکار در حافظه دستگاه ذخیره شده و به همراه فایل‌های مربوط به داده‌های GPR به کامپیوتر انتقال یافته است.

۵. بحث (پردازش و تفسیر داده‌ها GPR)

به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی، دستیابی به تصویری واضح از اهداف زیرسطحی با حذف نویزهای ناخواسته و تقویت سیگنال‌ها (افزایش نسبت سیگنال به نویز) است. پردازش‌های مناسب به مفسر کمک می‌کند تا با اعتماد به نفس بیشتری به تفسیر

۴. برداشت داده‌های GPR

به دلیل وابستگی برخی از پارامترها مانند عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، نوع آرایش برداشت داده‌ها و فرکانس مرکزی آنتن فرستنده، نمی‌توان بعد از برداشت داده‌ها با اعمال پردازش این پارامترها را تقویت کرد؛ بنابراین قبل از برداشت داده‌ها، باید با توجه به زمین‌شناسی منطقه و پارامترهای فیزیکی و هندسی هدف مورد مطالعه، پارامترهای برداشت را تعریف کرد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، با افزایش رسانندگی و فرکانس، عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین باید بین عمق نفوذ مورد نظر و تفکیک‌پذیری مورد نیاز، توازن ایجاد کرد. بدین دلیل پیشنهاد می‌شود که از فرکانس‌های پایین (۳۰-۵ MHz) برای نمایش توپوگرافی بستر یخچال، از فرکانس‌های میانی (۳۷۰-۳۲۰ MHz) برای نمایش ساختارهای داخلی و از فرکانس‌های بالا (۱۰۰۰ MHz-۶۰۰) به منظور آشکارسازی ضخامت برف استفاده شود. بنابراین فرکانس آنتن، ثابت دی‌الکتریک محیط، عمق تجسس مورد نظر، فاصله بین فرستنده و گیرنده و فاصله بین ردها، پارامترهای اساسی در بررسی‌های GPR هستند. بدین دلیل در این پژوهش داده‌های GPR با استفاده از دستگاه Mala GeoScience با آنتن مرکزی ۲۵ مگاهرتز با هدف تعیین ضخامت و نمایش توپوگرافی بستر یخچال علم‌کوه برداشت شده‌اند. این سیستم یک رادار پالسی

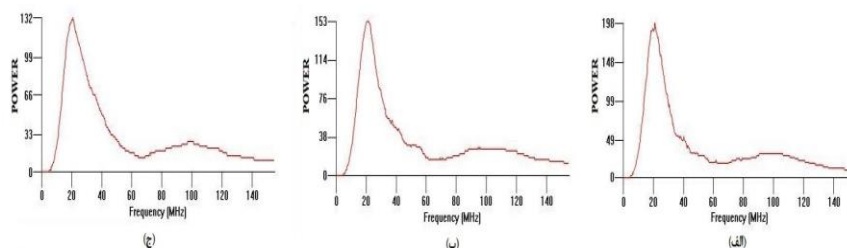
مگه‌تر است؛ بنابراین با استفاده از رابطه (۴) و با در نظر گرفتن سرعت 0.16 m ns^{-1} برای انتشار موج الکترومغناطیسی در یخ، تفکیک پذیری قائم به صورت تئوری بین $3/75$ تا $1/87$ متر تخمین زده می‌شود. نزدیکی فرکانس غالب با فرکانس امواج ارسالی (MHz) (۲۵) دلیلی بر شفاف بودن محیط انتقال‌دهنده (یخچال علم کوه) برای امواج الکترومغناطیسی است.

در شکل ۴ میانگین طیف دامنه بر حسب زمان انتشار موج الکترومغناطیسی، برای پروفیل‌های مورد بررسی نشان داده شده است. در این نمودارها پیک‌هایی که نمایانگر ناپیوستگی در ساختار یخ هستند، با پیکان مشخص شده است. روی هر سه نمودار، دو پیک نزدیک به هم در زمان‌های اولیه مشاهده می‌شود که احتمالاً به فصل مشترک برف- واریزه و واریزه- برف مربوط است. با مشخص کردن سطح دامنه نویز و با استفاده از فرمول ۱، می‌توان بیشترین عمق نفوذ را از نمودارهای طیف دامنه تخمین زد. در نمودارهای شکل ۴، سطح دامنه نویز، ۱۰ است که با در نظر گرفتن سرعت متوسط 0.16 متر بر نانوثانیه برای موج الکترومغناطیسی در یخ، بیشترین عمق نفوذ در پروفیل‌های مورد بررسی حدود ۱۱۵ متر تخمین زده می‌شود. کاهش تدریجی طیف دامنه با زمان در هر سه نمودار، نشان‌دهنده نارسا بودن محیط انتقال‌دهنده موج است.

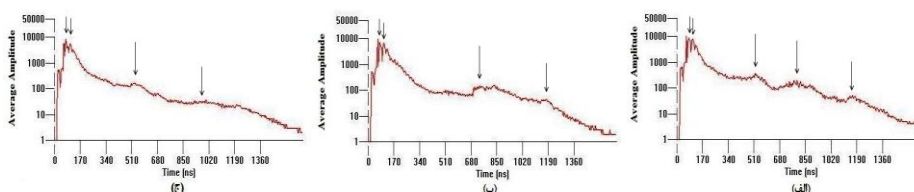
مقاطع ژئوفیزیکی بردارد. دامنه پردازش‌های به کاررفته روی داده‌های GPR، توسط هدف مورد مطالعه تعیین می‌شوند. در این پژوهش داده‌های GPR برداشت شده توسط نرم‌افزارهای Reflexw و Win_Ekko_Pro به صورت ترکیبی پردازش شده و به نمایش درآمده است.

۵. ۱. تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های مورد بررسی

پردازش‌های به کاررفته در GPR، توسط هدف مورد مطالعه تعیین می‌شوند؛ بنابراین قبل از اعمال هرگونه پردازش و صافی، لازم است دیدی صحیح از طیف دامنه و میانگین دامنه پروفیل‌های مورد بررسی وجود داشته باشد. نمودار طیف دامنه به منظور تعیین فرکانس غالب و طراحی فیلترهای مناسب برای حذف نویزهای با فرکانس مشخص، مفید است. شرکت‌های سازنده دستگاه‌های GPR، فرکانس آنتن‌ها را بر مبنای اندازه‌گیری در هوا مشخص می‌کنند. بنابراین فرکانس داده‌های برداشت شده بر روی زمین، به دلیل حذف فرکانس‌های بالا در محیط‌های رسانا (نسبت به هوا)، معمولاً کمتر از فرکانس امواج ارسالی است. در شکل ۳ میانگین طیف دامنه پروفیل‌های a، b و c نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرکانس غالب روی هر سه نمودار طیف دامنه، $21/30$



شکل ۳. (الف)، (ب) و (ج)؛ به ترتیب میانگین طیف فرکانسی پروفیل a، b و c



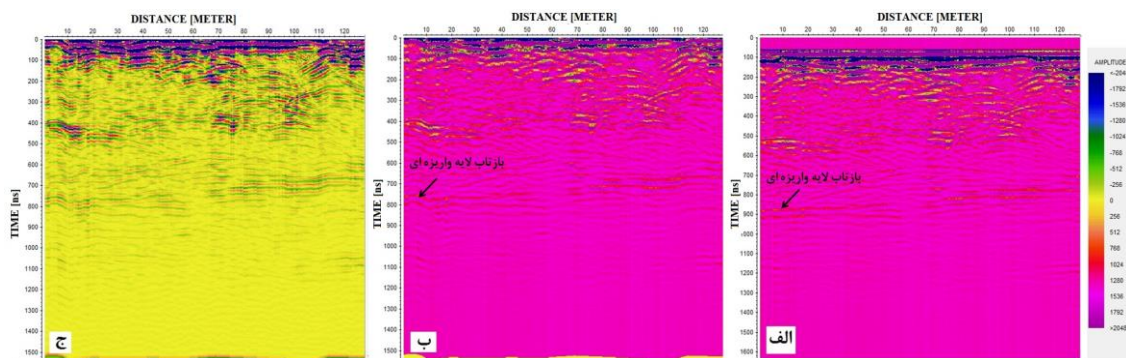
شکل ۴. (الف)، (ب) و (ج)؛ به ترتیب میانگین طیف دامنه پروفیل a، b و c

استفاده کرد. یکی از صافی‌های بالاگذر مناسب برای حذف این آثار که در همه نرم‌افزارهای GPR موجود است، صافی Dewow است. این صافی با استفاده از صافی میانگین‌گیر پی‌درپی (Running average)، فرکانس‌های پایین را حذف می‌کند. با مقایسه دامنه ردهای مقاطع GPR، می‌توان اثر اشباع سیگنال و صافی Dewow را مشاهده کرد (شکل‌های ۵-الف و ۵-ج).

همانطور که در نمودارهای میانگین طیف دامنه پروفیل‌های مورد بررسی مشاهده شد (شکل ۴)، قدرت امواج الکترومغناطیسی GPR با گذر زمان و نفوذ به عمق خصوصاً در زمان‌های پایانی، کاهش می‌یابد. بدین منظور، معمولاً از بهره‌های گوناگون برای تقویت سیگنال‌ها استفاده می‌شود. هرچند استفاده از بهره‌ها باعث افزایش قدرت سیگنال و نمایش بهتر داده‌ها می‌شود، ولی به منظور جلوگیری از تقویت نویزهای ایجادشده توسط پردازش‌های دیگر مانند مهاجرت، بهتر است بلافاصله بعد از پردازش‌های مربوط به افزایش نسبت سیگنال به نویز (در این تحقیق صافی Dewow)، این پردازش را اعمال کرد. در این پژوهش از بهره گسترش هندسی و نمایی (Spreading and Exponential Compansation Gain) برای جبران افت انرژی ناشی از گسترش کروی موج در محیط و اتلاف نمایی انرژی ناشی از رسانندگی استفاده شده است. با اعمال این بهره، سیگنال‌ها به حالت واقعی خود نزدیک‌تر می‌شوند؛ همچنین اطلاعات دامنه نسبی بازتاب‌ها حفظ می‌شوند و می‌توان بازتاب‌کننده‌ها را حتی بعد از اعمال بهره باهم مقایسه کرد (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹).

۵.۲. پردازش و تفسیر پروفیل a

مقطع پروفیل a با طول ۱۲۷ متر، دارای نمونه زمانی و ۴۲۵ رد GPR است (شکل ۵-الف). در دستگاه‌های GPR معمولاً اول گیرنده شروع به دریافت امواج الکترومغناطیسی می‌کند و سپس فرستنده امواج را به داخل زمین منتشر می‌کند؛ بنابراین همیشه در بالای مقطع، محدوده‌ای فاقد سیگنال وجود دارد. همچنین امواج مستقیم هوایی و زمینی در ابتدای ردها قرار دارند. وجود این مناطق و امواج در مقاطع زمانی و عمقی GPR، به دلیل جابه‌جایی بازتاب‌های زیرسطحی در راستای قائم، باعث خطا در تخمین عمق اهداف زیرسطحی می‌شود؛ بنابراین در این پژوهش به منظور قرارگیری نقطه شروع ردها در سطح زمین و قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی خود از تصحیح استاتیک (static correction) استفاده شده است (شکل ۵-ب). با مقایسه شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، مشاهده می‌شود که بعد از اعمال تصحیح استاتیک، بازتاب مربوط به واریزه‌های داخل یخ حدود ۱۰۰ نانوثانیه جابه‌جا شده است. همچنین با توجه به فاصله زمانی کوتاه بین انتشار موج الکترومغناطیسی توسط فرستنده و پالس‌های قوی‌ای که از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و به علت بازتاب‌های نزدیک به سطح زمین، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود (نیل، ۲۰۰۴)؛ این فرایند، نوفه‌های فرکانس پایینی را در زیر سطح زمین القاء می‌کند که بازتاب‌های فرکانس‌های بالا را می‌پوشاند. این نوفه‌ها باعث جمع‌شدن مقدار ثابتی بر روی تمام رد GPR می‌شود. برای حذف این نوفه‌های فرکانس پایین می‌توان از صافی‌هایی که باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌شوند،



شکل ۵. (الف)، (ب) و (ج)؛ به ترتیب مقطع بدون پردازش، با اعمال تصحیح استاتیک و صافی Dewow پروفیل a را نمایش می‌دهند.

پروفیل آشکارسازی شده است. بستر یخچال در زیر پروفیل مورد بررسی در زمان ۱۱۰۰ نانوثانیه آشکارسازی شده است (شکل ۶-ج).

۵.۳. بررسی نشانگرهای لحظه‌ای در تفکیک ساختارهای پروفیل a

یک سیگنال ژئوفیزیکی (ردهای GPR یا لرزه‌ای) که با رابطه ۵ نشان داده می‌شود، از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل شده است که قسمت موهومی تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی است (لیو و اریستاگلیو، ۱۹۹۸):

$$z(t) = s(t) + is^*(t) = a(t)e^{iv(t)} \quad (5)$$

که در آن، $s(t)$ قسمت حقیقی و $s^*(t)$ قسمت موهومی سیگنال است. نشانگرهای دامنه و فاز لحظه‌ای به ترتیب به صورت طیف دامنه و فاز این سیگنال‌های مختلط به وسیله روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند (لیو و اریستاگلیو، ۱۹۹۸):

$$a(t) = [s(t)^2 + s^*(t)^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$v(t) = \tan^{-1} \left[\frac{s^*(t)}{s(t)} \right] \quad (7)$$

نشانگر دامنه لحظه‌ای، یک موجک با قسمت‌های مثبت و منفی روی رد را به صورت یک تک پالس با مؤلفه مثبت تبدیل می‌کند. این فرایند ماهیت نوسانی امواج رادار را از بین برده و داده‌ها را در تفکیک واقعی خود نمایش می‌دهد. همچنین نشانگر دامنه لحظه‌ای، سبب سادگی در نمایش داده‌های رادار، افزایش قدرت سیگنال، تفکیک بهتر لایه‌بندی و تفسیر راحت‌تر می‌شود. نشانگر فاز لحظه‌ای برای تأکید بر پیوستگی رویدادها به کار برده می‌شود. با توجه به اینکه نشانگر فاز از دامنه سیگنال مستقل است، می‌تواند حادثه‌های ضعیف مربوط به فصل مشترک‌های نزدیک را روی سیگنال بهتر نمایش دهد. مقدار این نشانگر همیشه بین $+\pi$ تا $-\pi$ قرار دارد؛ بنابراین داده‌ها به صورت دندان‌های نمایش داده می‌شوند (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹). نشانگر فرکانس لحظه‌ای که از مشتق زمانی نشانگر فاز لحظه‌ای به دست می‌آید، طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود (لیو و اریستاگلیو، ۱۹۹۸):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dv(t)}{dt} \quad (8)$$

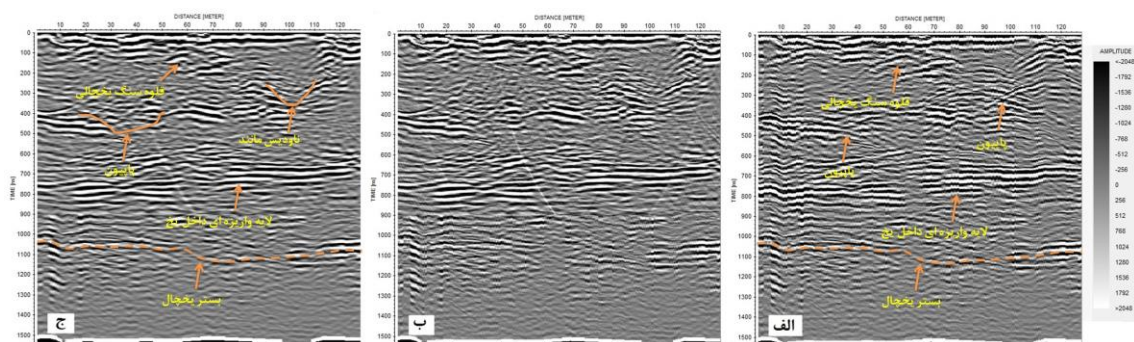
شکل ۶-الف مقطع زمانی پروفیل a را بعد از اعمال تصحیح استاتیک، صافی Dewow و بهره گسترش نمایی و هندسی را نمایش می‌دهد. در این مقطع، هذلولی‌های داخل یخ که نشانگر حضور قطعات سنگ (قلوه سنگ یخچالی) هستند، با ابعادی در حدود طول موج امواج GPR (۳/۷۵ تا ۱/۸۷ متر)، مشاهده می‌شوند. همچنین دو شکل پایونی به دلیل ناودیس‌مانندهایی در این مقطع مشخص شده است. بدین منظور از مهاجرت f-k با سرعت ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه برای موج الکترومغناطیسی در یخ که سبب جمع شدن هذلولی‌ها، حذف اثر پایون و نمایش واقعی ناهمگنی‌های داخل یخ می‌شود، استفاده شده است (شکل ۶-ب). در این نوع مهاجرت، داده‌ها نخست توسط تبدیل فوریه دوبعدی، از حوزه مکان-زمان به حوزه فرکانس-طول موج منتقل می‌شوند و پس از محاسبات مربوط به مهاجرت، مجدداً داده‌ها توسط تبدیل فوریه معکوس به حوزه مکان-زمان بازگردانده می‌شوند. این امر باعث کاهش تعداد محاسبات پیچیده در فرایند مهاجرت می‌شود (کمپن و سهلی، ۱۹۹۹). در واقع هدف از به کارگیری مهاجرت بازسازی توزیع هندسی سطح بازتاب‌کننده‌ها و تصویری دقیق از ساختارهای زیر سطحی است (جول، ۲۰۰۹). در نهایت برای حذف نویزهای پراکنده در مقطع نهایی از صافی ساده میانگین پی‌درپی، استفاده شده است (شکل ۶-ج). این صافی با میانگین‌گیری دامنه تعدادی از ردهای مجاور، نویزهای پراکنده را سرشکن می‌کند. شکل ۵ مقطع زمانی خام و مراحل مختلف پردازش روی پروفیل a را نمایش می‌دهد. داده‌های پردازش شده GPR، ساختارهای مختلف زیرسطح یخچال را نمایش می‌دهند (شکل ۶-ج). هرگونه تغییر در ثابت دی‌الکتریکی محیط انتقال‌دهنده موج، به صورت انعکاس در مقطع GPR مشاهده می‌شود. این تغییر پیوسته در بستر یخچال که به دلیل تباین گذردهی الکتریکی سنگ بستر (گرانیت) و یخ است، با توجه به حضور لایه‌های واریزه‌ای داخل یخ، به شدت تضعیف شده است. در این مقطع یک لایه واریزه‌ای پیوسته در داخل یخ، به‌طور واضح از زمان ۸۰۰ تا ۷۵۰ نانوثانیه، از ابتدا تا انتهای

بازتاب با قدرت بالا آشکارسازی شده است. نشانگرهای فاز و فرکانس لحظه‌ای در نمایش ساختارهای مختلف یخچال نسبتاً ضعیف عمل کرده‌اند.

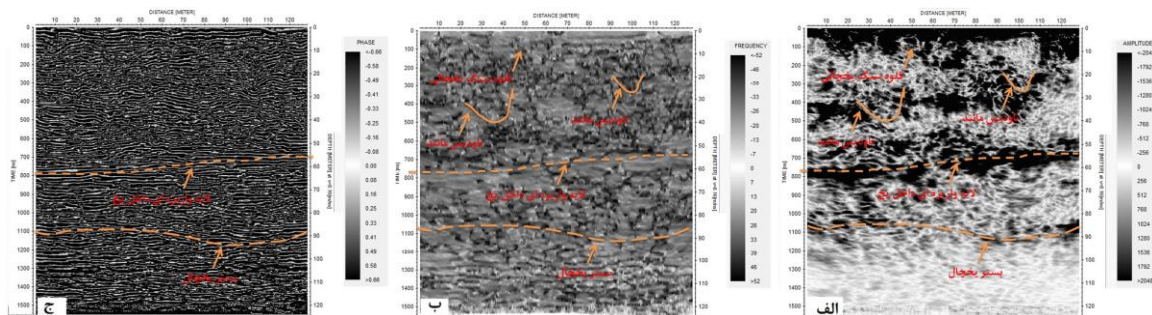
۴.۵. پردازش و تفسیر پروفیل‌های b و c

مقطع پروفیل‌های b و c به ترتیب با طول ۱۴۲/۵ و ۲۴۹ متر، شامل ۴۷۶ و ۸۳۱ رد GPR هستند. باتوجه به وجود توپوگرافی در محل پروفیل‌های b و c مراحل پردازش این پروفیل‌ها، علاوه بر پردازش‌های به کاررفته در مورد پروفیل a، شامل تصحیحات مربوط به توپوگرافی نیز است. به طور کلی توپوگرافی در سطح زمین باعث اغتشاش و بهم ریختن داده‌های GPR می‌شود. بدین منظور برای حذف این گونه اغتشاشات ناخواسته حاصل از توپوگرافی و قراردادن حادثه‌ها در مکان واقعی خود، لازم است تصحیحات مربوط به توپوگرافی اعمال شود. تصحیح توپوگرافی، فرایند انطباق داده‌های توپوگرافی با داده‌های GPR است. جمع‌آوری داده‌های توپوگرافی یکی از فرایندهای وقت‌گیر در بررسی‌های GPR است.

از نشانگر فاز لحظه‌ای به عنوان یک ابزار همبستگی استفاده می‌شود. خصوصیات فرکانس یک سیگنال با تغییر جنس لایه‌ها، تغییرات ضخامت یا در فصل مشترک‌ها مانند سطح ایستایی تغییر خواهد کرد (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹)؛ بنابراین بعد از پردازش‌های ذکر شده در قسمت قبل، نشانگرهای دامنه، فرکانس و فاز لحظه‌ای به منظور تفکیک بهتر لایه‌ها و ساختارهای داخلی استخراج شده‌اند (شکل ۷)؛ الف، ب و ج). هدف از به کار بردن نشانگرها تفکیک بهتر لایه‌ها و آنومالی‌های زیرسطحی در مقاطع GPR و لرزه‌ای به منظور تفسیر بهتر مقاطع مورد نظر است. بازتاب‌های لایه‌واریزه‌ای پیوسته داخل یخ در مقطع نشانگر دامنه لحظه‌ای به وضوح آشکارسازی شده است ولی همانطور که پیش‌تر ذکر شد؛ بازتاب‌های بستر یخچال به دلیل لایه‌های واریزه داخل یخ، به شدت تضعیف شده است. بازتاب‌های فصل مشترک برف- واریزه و واریزه- یخ باتوجه به طول موج بالای امواج GPR در این مورد و نازک بودن لایه‌های واریزه و برف، با هم تداخل کرده‌اند و قابل تفکیک نیستند. این لایه‌ها در مقطع نشانگر دامنه لحظه‌ای به صورت یک



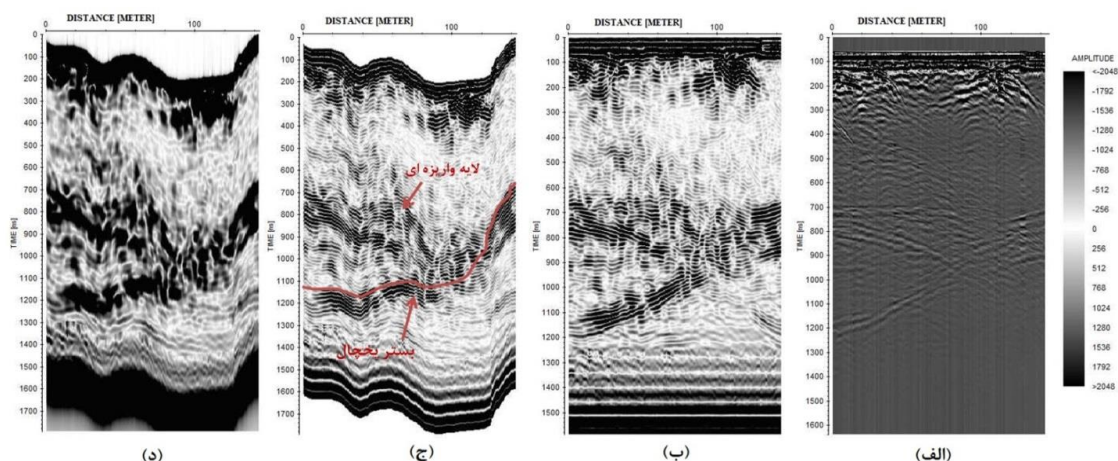
شکل ۶. الف)، ب) و ج)؛ به ترتیب مقطع پروفیل شکل ۵-ج، بعد از اعمال بهره گسترش نمایی و هندسی، مهاجرت f-k و صافی میانگین پی‌درپی



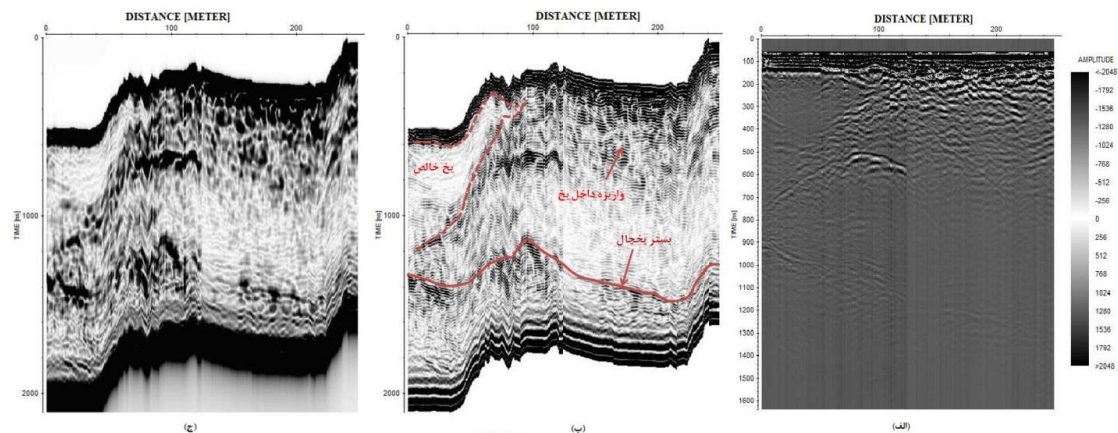
شکل ۷. الف) مقطع نشانگر دامنه لحظه‌ای، ب) مقطع نشانگر فاز لحظه‌ای و ج) مقطع نشانگر فرکانس لحظه‌ای

را به ترتیب بعد از پردازش‌های صافی میان‌گذر، تصحیح استاتیک، بهره‌گسترش نمایی و هندسی، مهاجرت f-k و تصحیح توپوگرافی نمایش می‌دهند. در این پروفیل‌ها نیز از مهاجرت f-k به منظور حذف اثر شیب لایه‌های زیرسطحی و جهت‌گیری فرستنده و گیرنده با در نظر گرفتن سرعت ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه برای امواج الکترومغناطیسی در یخ، استفاده شده است. بعد از پردازش‌های گفته‌شده و تصحیح توپوگرافی، بستر یخچال و واریزه‌های داخل یخ در هر دو پروفیل به خوبی آشکارسازی شده است. همچنین در مقطع زمانی پروفیل c (شکل ۹-ب) یک ناحیه شامل یخ خالص (بدون واریزه) آشکارسازی شده است.

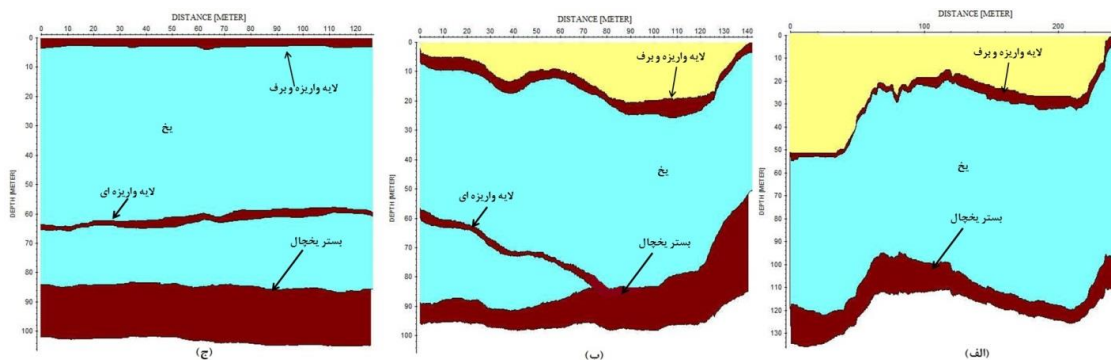
داده‌های توپوگرافی را می‌توان توسط تئودولیت لیزری (laser theodolite)، توتال استیشن (Total Station)، GPS و DGPS به دست آورد؛ با توجه به دقت مورد نیاز، مدت زمان در دسترس، هزینه و نیروی کاری، می‌توان یکی از این موارد را انتخاب کرد. مرحله بعد، فرایند خیلی وقت‌گیر انطباق داده‌های توپوگرافی و GPR است. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، در این تحقیق با استفاده از GPS نصب‌شده روی دستگاه GPR، به ازای هر رد برداشتی مختصات یک نقطه نیز برداشت شده است. بدین ترتیب مراحل وقت‌گیر اکتساب و انطباق داده‌های توپوگرافی با داده‌های GPR تا حدود زیادی کاهش یافته است. شکل‌های ۸-ج و ۹-ب، مقاطع زمانی پروفیل‌های b و c



شکل ۸. مراحل مختلف پردازش داده‌های پروفیل b. (الف) داده‌های خام، بعد از اعمال تصحیح استاتیک، صافی Dewow، (ب) بهره‌گسترش نمایی و هندسی و مهاجرت f-k، (ج) بعد از اعمال تصحیح توپوگرافی و (د) نشانگر دامنه لحظه‌ای



شکل ۹. (الف) داده‌های خام پروفیل c، بعد از اعمال تصحیح استاتیک، صافی Dewow، تابع تقویت، مهاجرت f-k، (ب) اعمال تصحیح توپوگرافی و (ج) نشانگر دامنه لحظه‌ای



شکل ۱۰. الف)، (ب) و (ج)؛ به ترتیب مقطع عمقی پروفیل‌های c، b و a

با افزایش شیب سطح زمین، ضخامت لایه نازک (لایه اول) نیز کم می‌شود. (شکل ۹-ب و ج). همچنین پیوستگی لایه واریزه‌ای داخل یخ در دو پروفیل a و b خود دلیلی بر تفسیر صحیح مقاطع مورد بررسی است. در پروفیل c از فاصله ۳۴ تا ۵۶ و ۲۲۳ تا ۲۳۹ متری ابتدای پروفیل که شیب سطح یخچال در مقایسه با قسمت‌های دیگر پروفیل زیاد است، ضخامت یخچال در مقایسه با بخش‌های دیگر کمتر است. از فاصله ۱۲۵ تا ۱۴۲ متری ابتدای پروفیل b نیز چنین وضعیتی مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که بستر یخچال در محل پروفیل a که سطح یخچال بدون توپوگرافی است، صاف و هموار است؛ بنابراین می‌توان گفت که توپوگرافی بستر یخچال، کمی نسبتاً دقیقی از توپوگرافی سطح یخچال است.

۶. نتیجه‌گیری

وضعیت آب‌وهوایی خیلی سرد منطقه علم‌کوه، غیرمخرب بودن، کم‌هزینه بودن، بالابودن قدرت تفکیک و سرعت زیاد برداشت داده‌ها در روش GPR، سبب شده است که استفاده از این روش روی یخچال علم‌کوه جهت تخمین ضخامت و تفکیک لایه‌ها مفید واقع شود. پس از پردازش‌های مناسب و تفسیرهای دقیق، مقاطع عمقی GPR با در نظر گرفتن سرعت ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه برای موج الکترومغناطیسی در یخ از مقاطع زمانی GPR استخراج شد و ضخامت یخ زیرسطحی در محل پروفیل a بین ۸۴ تا ۸۶ متر، در پروفیل b بین ۸۲ تا ۶۰ و در

۵.۵. مقاطع عمقی پروفیل‌های a، b و c

مقطع زمانی GPR زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی را نمایش می‌دهد. برای تبدیل مقطع زمانی به مقطع عمقی و برخی پردازش‌ها مانند مهاجرت و تصحیح توپوگرافی که پیش‌تر روی پروفیل‌های مورد بررسی اعمال شدند، لازم است سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط مورد بررسی تخمین زده شود. از روش‌های مختلفی همچون برداشت‌های نقطه عمق مشترک (Common Mid-Point)، استفاده از اهداف در عمق مشخص و جداول مربوط به سرعت موج الکترومغناطیسی با معلوم بودن جنس لایه‌ها و محیط مورد بررسی برای تخمین سرعت موج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به جدول ۱ و معلوم بودن جنس لایه‌های مورد بررسی، سرعت موج الکترومغناطیسی برای لایه اول (لایه واریزه و برف) با توجه به لایه برف آبی در زمان برداشت و جنس واریزه‌ها (گرانیت)، ۰/۱ متر بر نانوثانیه و برای لایه دوم (یخ) به دلیل وجود واریزه در یخ، ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه (کمتر از سرعت موج الکترومغناطیسی در یخ خالص) انتخاب شده است. همان‌طور که از مقطع عمقی سه پروفیل a، b و c مشخص است (شکل ۱۰)، ضخامت یخ در زیر این سه پروفیل به ترتیب از ۸۴ تا ۸۶، ۸۲ تا ۶۰ و ۵۰ تا ۹۴ متر متغیر است. ضخامت لایه اول (لایه برف آبی و واریزه) که به ترتیب بر روی پروفیل‌های a، b و c، ۳، ۵ تا ۱ و ۵ تا ۵ متر متغیر است، نیز مشخص شده است. در مقاطع عمقی پروفیل c و b مشاهده می‌شود که

تشکر و قدردانی

داده‌های تحقیق حاضر حاصل مطالعات یخچالی صورت گرفته در مؤسسه تحقیقات آب کشور است که زیر نظر پژوهشکده منابع آب و در قالب طرح ملی «محافظت از یخچال‌های طبیعی کشور» صورت گرفته است؛ بنابراین از زحمات تمامی عزیزانی که ما را در اجرای هرچه بهتر این تحقیق یاری کرده‌اند کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم. همچنین از جناب آقای دکتر sandmeier که نرم‌افزار Reflexw را در اختیار محققان قرار داده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

وزیری، ف.، ۱۳۸۲، هیدرولوژی کاربردی در ایران (شناسایی یخچال‌های طبیعی در ایران)، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تهران-ایران.

سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش شکران، ۱۹۷۷.

- Angelopoulos, M. C., Pollard, W. H. and Couture N. J., 2013, The application of CCR and GPR to characterize ground ice conditions at Parsons Lake, Northwest Territories, Cold Regions Science and Technology, 85, 22-33.
- Binder, D., Bruckl, E., Roch, K. H., Behm, M., Schoner, W. and Hynek, B., 2009, Determination of total ice volume and ice-thickness distribution of tow glaciers in the Hohe Tauern region, Eastern Alps, from GPR data. *Annals of Glaciology*, 50, 71-79.
- Bose, R. N., Dutta, N. P. and Lahiri, S. M., 1971, Refraction Seismic Investigation at Zemu Glacier, Sikkim, *Journal of Glaciology*, 10, 113-119.
- Brandt, O., Taurisano, A., Giannopoulos, A., Kohler, J., Brandt o., Langley K., Kohler J. and Hamran S. E., 2007, Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard. *Remote Sensing of Environment*, 111(2), 213-226.
- Daniels, D. J., 2004, Ground penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers.
- David, E., James, W. and David, R., 2007, Shallow seismic surveys and ice thickness estimates of the Mullins Valley debris-covered glacier, McMurdo Dry Valleys, Antarctica, *Antarctic Science*, 19, 485-496.
- Crossley, D. J and Clarke, G. K. C., 1970,

پروفیل C بین ۵۰ تا ۹۴ متر تخمین زده شده است. همچنین نشانگرهای دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای برای تفکیک بهتر لایه‌ها و واریزه‌های داخل یخ استخراج شد. از این نشانگرها بعد از پردازش مناسب، به‌منظور تفسیر بهتر و روشن‌تر مقاطع GPR استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که نشانگر دامنه لحظه‌ای، لایه‌ها و قلوه‌سنگ‌های یخچالی را با جزئیات بیشتر تفکیک کرده است. در نهایت مشخص شده است که توپوگرافی سطح یخچال علم کوه کپی نسبتاً دقیقی از توپوگرافی بستر یخچال است؛ بنابراین از رابطه (۱) می‌توان برای قسمت‌هایی از یخچال علم کوه که توسط GPR برداشت نشده است یا داده‌های آن‌ها قابل تفسیر نیست، با تقریب خوبی استفاده کرد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که روش GPR را می‌توان روشی مناسب به‌منظور تخمین ضخامت و توپوگرافی بستر یخچال‌ها معرفی کرد. برای تفکیک بهتر و بیشتر لایه‌ها پیشنهاد می‌شود از آنتن‌هایی با فرکانس‌های بالاتر که قابلیت تفکیک بیشتری دارند، استفاده شود.

Gravity Measurements on "Fox Glacier", Yukon Territory, Canada, *Journal of Glaciology*, 9, 363-374.

Eder, K., Reidler, C., Mayer, C. and Leopold, M., 2008, Crevasse detection in Alpien areas using ground penetrating radar as a component for a mountain gulde system, the international archives of the photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, 837-842.

Hagg, w., Mayer, c., Lambrecht, A. and Kriegel, D., 2012, Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan, *Global and Planetary Change*, In press.

Jol, H. M., 2009, Ground penetrating radar: Theory and Applications, Oxford, Elsevier Science.

Karimi, N., Farokhnia, A., Shishangosht, S., Elmi, M., Eftekhari, M. and Ghalkhani, H., 2012, Elevation changes of Alamkouh glacier in Iran since 1955, based on remote sensing data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 45-58.

Kennett, P., 1966, Reconnaissance gravity and magnetic surveys of part of the Larsen ice shelf and adjacent mainland, *British Antarctic Survey Bulletin*, 8, 49-62.

Kempen, L. V. and Sahli, H., 1999, Ground penetrating radar processing: a selective

- survey of the state of the art literature, Virje Universiteit Brussel- Faculty of Applied Sciences.
- Liu, L. and Oristaglio, M., 1998, GPR signal analysis: instantaneous parameter estimation using the wavelet transform, International Conference on Ground Penetrating Radar, pp 219-224, Lawrence, Kansas.
- Moya, Q. V., Mano, A., Asaoka, Y., Udo, K., Kure, S. and Mendoza, J., 2013, Probabilistic estimation of glacier volume and glacier bed topography, the Andean glacier Huayna West. The Cryosphere Discuss., 7, 3931-3967.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, Earth- science Reviews, 66, 261-330.
- Palli, A., 2003, Polythermal glacier studies in Svalbard determined by ground penetrating radar, Department of Geosciences University of OUL.
- Pellikka, P. and Gareth, W., 2010, Remote sensing of glaciers, CRC press.
- Sensors and software, 1999, Win_EKKO User's Guide, Version 1.0.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 2004, Applied geophysics, Cambridge university press.
- Watson, M. I., Yelf, R. J. and Bertler, N. A N., 2008, Bedrock topography and Isochrone mapping of five glaciers in Victoria Land, Antarctica, 12th International Conference on Ground Penetrating Radar.