

## بررسی یخچال طبیعی علم چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

نویسنده: محمد جواد ولدان زوج\*، یوسف رضائی\*، فریبرز وزیری\* و محمد رضا مباحثی\*

\*دانشگاه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### Investigation on Alam Chal Glacier Using Satellite Images

By: M. J. Valadan Zouj\*, Y. Rezaei\*, F. Vaziri\* & M.R. Mobasheri\*

\*K.N.Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۵/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۴/۱۷

#### چکیده

با توجه به اینکه مقدار قابل توجهی از آب شیرین ایران از منابع یخچال‌ها و برف‌چال‌های طبیعی تأمین می‌شوند، بنابراین مطالعه و حفاظت از این منابع ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعه شامل برآورد پارامترهای مختلف یخچالی نظیر بیشترین و کمترین ارتفاع، مساحت و محیط، موقعیت خط برف و... است. با توجه به مشکلات مطالعه مستقیم این مناطق از نظر هزینه و سختی کار، استفاده از فناوری سنجنش از دور جهت مطالعه و بررسی آنها بسیار کارا و مفید است. استفاده از الگوریتم‌های مختلف سنجنش از دور ماهواره‌ای برای آشکارسازی مناطق یخچالی و همچنین محاسبه پارامترهای مهم یخچالی از این جمله‌اند. برای رسیدن به این هدف، باید قابلیت تصاویر ماهواره‌ای از نظر قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتری برای مطالعه دقیق یخچال‌های طبیعی ایران را بررسی و ارزیابی کرد.

در این تحقیق، به منظور بررسی یخچال طبیعی علم چال، تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مختلف بررسی شدند و پارامترهای یخچالی به کمک تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شده مطالعه و شناسایی شدند تا تصاویر ماهواره‌ای بهینه که برآورد کننده دقت مطالعات یخچال‌های طبیعی ایران باشند، مشخص شوند. همچنین قابلیت‌های مدل ارتفاعی رقومی (DEM) در ترکیب با تصاویر ماهواره‌ای به منظور استخراج پارامترهای هندسی یخچال از قبیل وضعیت توپوگرافی کاسه یخگیر، ارتفاع حد بالا و پایین کاسه یخگیر، وضعیت توپوگرافی منطقه و حوضه آبریز و... مورد ارزیابی قرار گرفت.

**کلید واژه‌ها:** یخچال طبیعی، سنجنش از دور، طبقه‌بندی، تفسیر

#### Abstract

A considerable portion of potable water in Iran is supplied by natural glaciers, and then the study and protection of these resources are a necessity. This investigation includes the assessment of glacier parameters such as maximum and minimum altitude, area and perimeter, position of snow line and etc. Since direct measurement of these parameters in the field is time consuming and expensive, therefore, some techniques such as remote sensing seem to be more useful and plausible. In this regards, one can deploy different algorithms for detection of the glacier region as well as calculation of relevant important parameters.

To achieve this goal, the resolution of satellite images in spatial, spectral and radiometric aspects should be studied and assessed. In this research, satellite images with different resolutions have been used to study the Alam Chal Glacier. Using different satellite images, the glacier parameters have been identified and studied and the most appropriate images which can provide the necessary precision for this task were identified.

Also the potentiality of DEM (Digital Elevation Model) in combination with satellite images in order to obtain the glacier geometric elements such as the topography of cirque, maximum and minimum height, the topography of the district and watershed, has been investigated.

**Keywords:** Glacier, Remote sensing, Classification, Interpretation.

## ۱- مقدمه

و استفاده از فناوری، سنجش از دور ماهواره‌ای در این زمینه برای محققان بسیار مفید خواهد بود. زیرا با استفاده از این فناوری می‌توان بر آورد صحیحی از میزان منطقه پوشیده شده از برف داشته و وضعیت تغذیه یخچال و همچنین پارامترهای یخچالی را به دست آورد. همچنین می‌توان تغییرات آن را در فاصله‌های زمانی مختلف با دقت مناسب بررسی کرد.

ایران دارای ۵ منطقه یخچالی مهم است که از نظر ساختار زمین شناختی، به دو نوع با ساختار غیر قابل نفوذ و ساختار قابل نفوذ تقسیم می‌شوند.

از این مناطق یخچالی، یخچال‌های طبیعی علم کوه، دماوند در ساختار غیر قابل نفوذ و یخچال‌های مناطق زردکوه و اشتران کوه از نظر ساختار زمین‌شناسی دارای ساختاری آهکی بوده که با سه یخچال اول، از نظر شکل و عوارض یخچالی، متفاوت است. ستبرای یخ در یخچال‌های طبیعی که در واحدهای آهکی شکل گرفته‌اند، نسبت به یخچال‌های طبیعی موجود در واحدهای گرانیتی کمتر است. همچنین در این نوع یخچال‌ها، عوارض خاص یخچالی مانند شکاف‌ها و یخرفت‌ها بر سطح یخچال دیده نمی‌شود (وزیری، ۱۳۷۹)، به همین علت، این نوع یخچال‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و حتی به غلط به آنها برف چال نیز گفته می‌شود.

در این تحقیق، روش مطالعه یخچال‌های طبیعی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده و یخچال علم چال به عنوان منطقه مورد مطالعه، بررسی می‌شود. در ابتدا منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده معرفی می‌شود. در ادامه روش‌های بررسی یخچال طبیعی علم چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بیان و نتایج به دست آمده ارزیابی می‌شوند.

## ۲- پیشینه مطالعات یخچال‌ها در ایران

آثار ریخت‌شناسی یخبندان‌های کواترنری در ایران، دست کم از اواخر سده ۱۹ شناخته شده‌اند. برای مثال ژاک دومرگان (۱۸۹۰) در توصیف وضع طبیعی لرستان، از سیرک یخچال قدیمی اشتران کوه در ارتفاع ۳۸۰۰ متری و سیرک دیگری در قلیان کوه در ارتفاع ۲۴۴۰ متری نام برده است. پس از آن نیز گزارش‌های دیگری از یخچال‌های البرز، بویژه یخچال‌های علم کوه و تخت سلیمان توسط محققان دیگر تهیه شده است. این گزارش‌ها، عموماً

ثابت و محدود بودن منابع آب شیرین در چرخه طبیعت و بخصوص ایران که از مناطق نیمه خشک به شمار می‌آید از یک سو، و افزایش جمعیت و گسترش علم و صنعت و توسعه شهرها که افزایش چندین برابری مصرف آب را موجب گردیده‌است، از سوی دیگر ضرورت مطالعه و بررسی منابع تأمین آب شیرین کشور را نشان می‌دهد. در ایران، حوضه آبریز بیشتر رودهایی که جریان دائم دارند، برف گیر است و همچنین چشمه‌ها و دریاچه‌های آب شیرین نیز بیشتر در حوضه‌های آبریز برف گیر قرار دارند. بنابراین، درصد زیادی از منابع آب کشور از ذخایر برفی در یخچال‌ها و برف چال‌های طبیعی تأمین می‌شود (وزیری، ۱۳۷۹).

به طور کلی، یخچال‌های طبیعی به این صورت به وجود می‌آیند که برف به صورت بلورهایی با شکل‌های گوناگون بر روی سطح زمین سقوط می‌کند و در مناطقی که از نظر شرایط محیطی و جوی مستعد تشکیل یخچال طبیعی است، انباشته می‌شود. برف در اثر سه عامل مهم: دمای تابش خورشیدی، تصعید و اثر فشار فزاینده، دچار دگرگونی پیچیده‌ای شده که طی این فرایند، یخ یخچالی تشکیل می‌شود.

یخچال‌های طبیعی بسته به میزان توسعه یافتگی آنها، شکل و ارتباط بین منبع تغذیه و محدوده تخلیه آنها به سه دسته تقسیم می‌شوند (وزیری، ۱۳۷۹). نوع اول یخچال قاره‌ای یا صفحه‌ای که سطح یک قاره را می‌پوشاند مانند یخچال‌های طبیعی شمالگان و جنوبگان. نوع دوم این یخچال‌ها، به نام یخچال‌های متوسط یا اسکاندیناوی خوانده می‌شوند که در مناطق مسطح، همانند یخچال‌های قاره‌ای قرار گرفته و تا مناطق کوهستانی ادامه پیدا می‌کنند. در آنجا رفتاری شبیه یخچال‌های کوهستانی دارند و ترکیبی از یخچال‌های قاره‌ای و کوهستانی هستند. نوع سوم، یخچال آلپی یا کوهستانی، در مناطق کوهستانی شکل می‌گیرند و یخچال‌های طبیعی ایران نیز از این نوع است.

یخچال‌های طبیعی کوهستانی، بیشتر در مناطق صعب‌العبور کوهستانی قرار داشته و دسترسی و شرایط زندگی و اقامت بسیار سختی دارند. بنابراین، مطالعه و بررسی آنها با روش‌های معمول و قدیمی سخت، زمان‌بر و پرهزینه بوده در برخی از موارد نیز ناممکن به نظر می‌رسد. در نتیجه، استفاده از روش‌های نوین و جدید ضروری به نظر می‌رسد. تلفیق روش‌های میدانی

### یخچال علم چال و سر چال

ارتفاع خط برف دائمی در این یخچال در حدود ۴۰۰۰ تا ۴۱۵۰ متر است. سطح آن از رسوبات یخچالی ریز و درشت پوشیده شده است که ستبرای یخرفت‌های (مورن) اصلی آن از ۰/۵ متر تا ۱/۵ متر (در قسمت بالایی یخچال) می‌رسد. آنچه مسلم است در تمام قسمت‌های این ناحیه یخچالی، هیچ نشانه‌ای از یک یخچال فعال از قبیل شکاف‌ها و حرکت (جابه‌جایی شدید رسوبات یخچالی) دیده نمی‌شود.

### یخچال باختری و هفت خوان

این یخچال از دو یخچال تقریباً مجزا تشکیل شده که پس از الحاق زبانه سنگی، به هم می‌پیوندند. یخچال هفت خوان در جنوب و جنوب خاوری قله‌های خرسان و شمال باختر قله هفت خوان واقع شده است.

### یخچال حصارچال

این یخچال از دو یخچال دیگر کوچک‌تر بوده و از یک گستره وسیع یخچالی، محدود به قله علم خرسان، مناره، گردونه، لشگرک، تنگ گلو و شاخک تشکیل می‌شود. در حد بالای این یخچال قله‌های شاخک و علم در شمال و حد پایین آن تنگ گلو در جنوب باختر این یخچال می‌باشد. دو دریاچه فصلی هم در این یخچال دیده می‌شود. به طور کلی این مجموعه یخچالی به علت قرار گرفتن در دامنه جنوبی قله علم کوه و شرایط مساعد برای ذوب برف و یخ در ارتفاعات پایین‌تر، چندان فعال نمی‌باشد. یخچال‌های نسبتاً فعال مجموعه یخچالی حصارچال به شرح زیر است:

یخچال خرسان که در جنوب علم کوه و خاور قله‌های خرسان، باختر قله مرجی کش و شمال قله ستار و مناره قرار دارد. یخچال مرجی کش، خود از دو یخچال زیر قله شاخک و همچنین زیر قله مرجی کش تشکیل می‌شود. علاوه بر یخچال‌های فوق، در منطقه تخت سلیمان یخچال‌های پراکنده غیر فعال دیگری هم که بیشتر به صورت برف چال هستند به چشم می‌خورد، که به ترتیب عبارتند از: یخچال چالون در باختر قله سیاه‌سنگ، یخچال نفت چال محدود به قله سیاه‌کمان و نفت چال و دیر چال یخچال‌ها و برف چال‌های کوچک و پراکنده دیگر.

### ۳- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق به منظور مطالعه و بررسی یخچال علم چال از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک‌های مختلف استفاده شد تا بدین وسیله پتانسیل انواع تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک‌های مختلف در مطالعات یخچال‌های طبیعی ارزیابی شود. در جدول ۱ داده‌های مورد استفاده در این تحقیق معرفی شده است.

شرح عمومی یخچال‌های یاد شده را بیان کرده است (رضایی، ۱۳۸۳). از دیگر تحقیقات صورت گرفته توسط پژوهشگران خارجی، می‌توان به تحقیقات برادران مولر (۱۹۳۲)، هانس بوبک و داگلاس بسک در سال ۱۹۳۴ تا ۱۹۵۶ و اشتاین اور و گورتر (۱۹۳۶) اشاره کرد (عزیزی، ۱۳۶۴). تحقیقات مدونی در خصوص یخچال‌های طبیعی ایران، که بتوان به صورت مکتوب به عنوان مرجعی رسمی به آن اشاره نمود توسط وزیری (۱۳۷۹) انجام شده است. تحقیقات پراکنده دیگری وجود دارد که از آن جمله، می‌توان به نقشه‌ای اشاره کرد که در سال ۱۳۵۶ به وسیله سازمان جغرافیایی با همکاری فدراسیون کوهنوردی ایران از منطقه یخچالی تخت سلیمان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده است، که به احتمال زیاد، اساس این نقشه، نقشه تهیه شده به وسیله دکتر هانس بوبک بوده است. همچنین می‌توان به تحقیقاتی یمانی نیز اشاره کرد (یمانی، ۱۳۸۱). در این تحقیقات منطقه یخچالی علم کوه از نظر زمین‌ریخت‌شناسی بررسی شده است (یمانی، ۱۳۸۱) از دیگر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به گزارش پدرامی، از سازمان زمین‌شناسی، که در سال ۱۳۵۷ در مورد یخچال‌های منطقه علم کوه ارائه داده است، اشاره کرد (وزیری، ۱۳۷۹).

### ۲-۱- یخچال‌های طبیعی اطراف قله علم کوه (کوه‌های تخت سلیمان)

قله علم کوه با ارتفاع ۴۸۲۲ متر از سطح دریا در موقعیت جغرافیایی عرض ۲۲' ۳۶° شمالی و طول جغرافیایی ۵۷' ۵۰° خاوری، دومین ارتفاع بلند ایران است. این قله در منطقه‌ای به نام تخت سلیمان قرار دارد. شکل پستی و بلندی این ناحیه به گونه‌ای است که ۴۵ قله با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر (قله‌های شناخته شده و با نام) و ۱۰۰ قله با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا در این ناحیه وجود دارد. پستی و بلندی‌های فراوان و بخصوص رشته کوه مجرای هفت خوان با هفت قله با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر از سطح دریا و همچنین سرمای نسبتاً زیاد به علت اغتشاشات جوی و توفان‌های پرسرعت، سبب شده است که چند یخچال طبیعی نسبتاً مهم (البته مهم به لحاظ قرار گرفتن آنها در منطقه‌ای نیمه خشک مانند ایران) به وجود آیند. قله‌های مهم رشته کوه تخت سلیمان باعث پیدایش یخچال‌های طبیعی در این منطقه شده است. یخچال‌های طبیعی منطقه تخت سلیمان را می‌توان نسبت به قله علم کوه به سه یخچال عمده و مجزا از یکدیگر تقسیم بندی کرد:

- یخچال شمالی (یخچال علم چال و سر چال)

- یخچال باختری (یخچال باختری و هفت خوان)

- یخچال جنوبی (یخچال حصار چال)

لازم به ذکر است که یخچال‌های فوق، خود نیز به اجزای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند.

از قبیل کمترین و بیشترین ارتفاع، وضعیت توپوگرافی منطقه، توپوگرافی کاسه یخگیر، شیب و جهت شیب دست یافت. همچنین با ترکیب DEM با تصویر ماهواره‌ای می‌توان اطلاعات جامع‌تری در مورد یخچال طبیعی استخراج کرد.

به منظور تهیه و تولید مدل رقومی ارتفاعی روش‌های مختلفی وجود دارد، از آن جمله استفاده از نقاط مختصات دار (X,Y,Z)، استفاده از زوج تصویر ماهواره‌ای که به صورت استریو اخذ شده‌اند و استفاده از منحنی میزان را می‌توان نام برد. در این تحقیق با توجه به در اختیار داشتن نقشه‌های ۱:۲۵,۰۰۰ و با استفاده از منحنی میزان‌های آنها، مدل رقومی ارتفاعی تولید شد.

#### ۴- استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای

در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، استخراج اطلاعات به دو شیوه صورت می‌گیرد: یکی تحلیل رقومی و دیگری تفسیر بصری. در مطالعات یخچال‌های طبیعی از هر دو روش می‌توان استفاده نمود.

#### ۴-۱- تحلیل رقومی

##### • برآورد سطح برف موجود در یخچال

در مطالعات یخ و برف می‌توان از نسبت باندها ۳ به ۵ و نیز از نسبت باندها ۴ به ۵ (در صورتی که سطح یخچال با سایه پوشیده شده باشد) (Bayr et al., 1994) سنجنده‌های TM<sup>+</sup> و ETM<sup>+</sup> استفاده کرد. با استفاده از نسبت باندهای فوق می‌توان محدوده خط برف را استخراج کرد. در قسمت الف شکل ۲ اعمال نسبت باندهای ۳ به ۵ بر روی تصویر لندست و در قسمت ب اعمال حد آستانه مناسب بر روی قسمت الف به منظور استخراج محدوده برف نشان داده شده است. با استفاده از شاخص NDSI (Normalized Difference Snow Index) نیز می‌توان موقعیت خط برف را بر روی تصاویر شناسایی کرد. نتیجه این شاخص در محدوده ۱- و ۱+ بوده و به‌نحیج شده می‌باشند. در مورد سنجنده ETM<sup>+</sup> فرمول آن به صورت زیر است.

$$NDSI = \frac{ETM2 - ETM5}{ETM2 + ETM5}$$

شکل ۳ تصویر به‌دست آمده از نتیجه MDSI را نشان می‌دهد.

##### • طبقه‌بندی یخچال

به منظور استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه پوشش زمینی، می‌توان از الگوریتم‌های طبقه‌بندی استفاده کرد. در زمانی که می‌توان داده‌های آموزشی مناسب از منطقه جمع‌آوری کرد، روش طبقه‌بندی نظارت

انتخاب تصاویر با توجه به پارامترهایی مانند قابل دسترس بودن تصاویر در ایران، هزینه تهیه آنها و همچنین مشخصات فنی تصاویر نظیر: قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتری و زمان اخذ تصویر بوده است. علاوه بر تصاویر ماهواره‌ای فوق نقشه‌های توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ (به صورت رقومی) و عکس‌های هوایی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۴۰,۰۰۰ نیز استفاده شد.

#### ۳-۱- پیش پردازش تصاویر

اولین مرحله در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، انجام پیش پردازش شامل: تصحیحات رادیومتری و هندسی است. از آنجا که تصاویر در دسترس، تصاویری بودند که خطاهای رادیومتری مربوط به سنجنده در آنها تصحیح شده بود و اصطلاحاً "تصاویر Level 1" نامیده می‌شوند، بنابراین در این تحقیق فقط تصحیح جوی به روش کلی انجام شد. به منظور انجام تصحیح هندسی تصاویر، نیاز به نقاط کنترل زمینی است. برای استخراج نقاط کنترل می‌توان از نقشه‌های موجود استفاده کرد که با توجه به وجود نقشه‌ای با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ از منطقه علم‌چال، از آن برای تصحیح هندسی تصاویر لندست و ASTER استفاده شد ولی دقت لازم برای تصحیح تصویر IRS (با قدرت تفکیک ۵/۸ متر) و تصویر SPOT 5 (با قدرت تفکیک ۲/۵ متر) را ندارد. بنابراین برای تصحیح تصویر ماهواره‌ای IRS و SPOT 5 باید از نقاط کنترل دقیق‌تری استفاده کرد ولی چون این نقاط کنترل از قبل در منطقه موجود نبود، بنابراین از ارتوفتوی استخراج شده از منطقه با استفاده از عکس‌های هوایی و نقاط مثلث‌بندی هوایی استفاده شد. بدین منظور، با استفاده از عکس‌های هوایی و انجام توجیحات (داخلی، نسبی و مطلق) مدل‌ها تشکیل شدند و در مرحله بعد مدل ارتفاعی رقومی و ارتوفتو منطقه تولید گردید. بعد از تولید ارتوفتو هر کدام از مدل‌ها، این ارتوفتوها با همدیگر موزاییک شدند.

با استفاده از ارتوفتو موزاییک شده منطقه، تصویر SPOT 5 منطقه یخچالی با استفاده از ۱۲ نقطه کنترل و با دقت ۰/۵ پیکسل تصحیح هندسی شد. به منظور دستیابی به دقت بالا از توابع Rational در عملیات تصحیح هندسی استفاده شد. پس از تصحیح هندسی تصویر SPOT 5، بقیه تصاویر ماهواره‌ای موجود نیز نسبت به تصویر SPOT 5، هم مختصات (Register) شدند. در این مرحله از نرم افزار PCI Geomatica استفاده شد.

#### ۳-۲- تهیه DEM منطقه یخچالی

مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در مطالعات یخچال‌های طبیعی بسیار سودمند است (Poul et al., 2002). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه یخچالی می‌توان تحلیل‌های مختلفی را انجام داده و به اطلاعات مختلفی درباره یخچال

همسایگی عوارض مختلف با همدیگر، عوارض بر روی تصاویر ماهواره‌ای به صورت بصری شناسایی و مشخص می‌شوند. به منظور استفاده از روش تفسیر بصری، باید تصویر ماهواره‌ای از نظر رادیومتری در شرایط خوبی باشد و برای تفسیر بهتر، باید روش‌های بازسازی تصاویر ماهواره‌ای را به کار برد. همچنین مفسر باید اطلاعات مناسبی در رابطه با یخچال‌های طبیعی داشته باشد تا بتواند عوارض و اجزای یخچال طبیعی را کشف، شناسایی و تشخیص دهد، به طوری که در نهایت قادر باشد بر روی آنها تحلیل فنی انجام دهد. پس از شناسایی عارضه می‌توان با استفاده از فنون پردازش تصاویر، در مورد عوارض موجود بر روی تصاویر به تحلیل پرداخت. مراحل مختلف تفسیر یک تصویر به صورت زیر و شامل ۴ مرحله است (Civil N IIRS, 1996):

- کشف (Detection) مشاهده یک شی بدون تشخیص آن، به عنوان مثال، یک پدیده نقطه‌ای سفید بر روی تصویر سطح یخچال.
  - تشخیص (Recognition) توانایی قراردادن یک شناسه از یک جسم در یک طبقه از عوارض، مثلاً پدیده نقطه‌ای سفید، یک یخرفت است.
  - شناسایی (Identification) توانایی دقیق قراردادن یک شناسه از یک جسم در یک زیر طبقه (نوع عارضه مربوط)، مثلاً این یخرفت، یک یخرفت میانی است.
  - تحلیل فنی (Technical analysis) توانایی بیان دقیق توصیف‌های یک شی؛ برای مثال اندازه‌گیری ابعاد یخرفت و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های زمینی.
- در شکل ۶ مراحل مختلف کشف و تشخیص، شناسایی و تحلیل عارضه یخرفت بر روی تصویر ماهواره‌ای و در شکل ۷ شناسایی شکاف طولی بر روی یخچال نشان داده شده است.
- مقیاس بهینه برای استخراج عوارض و همچنین تفسیر آنها وابسته به قدرت تفکیک تصاویر و تمایز (کنتراست) عوارض موجود روی تصویر است.
- برای انجام هر نوع پردازش در مورد یک عارضه بر روی تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا باید آن عارضه شناسایی شود. برای رسیدن به این هدف، لازم است تصویر ماهواره‌ای دارای شرایط مناسبی از نظر: قدرت تفکیک رادیومتری، قدرت تفکیک طیفی و قدرت تفکیک مکانی باشد. برای مثال در تصاویر ۶ بیتی، در مناطقی که با سایه پوشیده شده است، عوارض قابل شناسایی نیستند ولی تصاویر ماهواره‌ای ۱۱ بیتی، در مناطق پوشیده از سایه، می‌توان عوارض بیشتری شناسایی کرد.

شکل‌های ۸ و ۹ مدل سه بعدی از منطقه را به تصویر می‌کشد. استفاده از مدل سه بعدی منطقه اطلاعات بسیار زیادی در رابطه با وضعیت کاسه یخگیر، تغذیه یخچال، وضعیت حوزه آبریز یخچال، دره یخچالی و ارتفاع حد بالا و پایین یخچال و... در اختیار محققان قرار می‌دهد.

شده بسیار مناسب است اما در خصوص مناطقی که تهیه نمونه‌های آموزشی امکان ندارد (مانند یخچال‌های طبیعی، که در آن حضور در منطقه یخچالی و تهیه نمونه‌های آموزشی به علت صعب‌العبور بودن منطقه خطر و هزینه زیادی دارد)، استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت نشده مناسب‌ترند. بنابراین استفاده از این روش‌ها که دست کم نیاز به حضور در منطقه یخچالی و تهیه نمونه‌های آموزشی دارد در مطالعات یخچال‌های طبیعی بسیار سودمند است. برای انجام طبقه‌بندی نظارت نشده، الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا از الگوریتم ایزودیتا به منظور طبقه‌بندی یخچال علم چال و استخراج محدوده آن استفاده شد. در شکل ۴، نتیجه حاصل از طبقه‌بندی تصویر لندست ۷ منطقه یخچالی علم چال با استفاده از الگوریتم ISO DATA و استخراج محدوده یخچال طبیعی مشاهده می‌شود. طبقه‌های به دست آمده در این الگوریتم ۱۰ طبقه شامل: قسمت‌های مختلف برف و یخ و عوارض سطحی دیگر موجود در منطقه یخچالی است. دلیل استفاده از ۱۰ طبقه، تنوع عوارض مختلف در منطقه یخچالی است. همچنین یخ و برف موجود در سطح یخچال دارای بازتابش‌های مختلف بوده و امکان قرارگیری آنها در یک طبقه واحد وجود نداشت و ۱۰ طبقه به صورت تجربی با انتخاب تعداد طبقه‌های مختلف به دست آمد و در نهایت با ادغام طبقه‌های مربوط به یخ و برف موجود در سطح یخچال، یک طبقه یخچال و با ادغام عوارض غیر یخچال در همدیگر، یک طبقه غیر یخچال با رنگ سبز را مشخص کردند. در مرحله قبل، محدوده یخچال طبیعی استخراج شد اما به منظور مطالعات ویژه، محدوده یخچال علم چال با استفاده از همان الگوریتم به ۱۵ طبقه مختلف طبقه‌بندی شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. ۱۵ طبقه شامل انواع مختلف عوارض موجود در سطح یخچال مثل؛ خاک موجود در سطح یخچال، برف و یخ و عوارض سطحی دیگر است. استفاده از این روش به محققان کمک می‌کند تا درک درستی از تنوع عوارض در سطح یخچال داشته باشند. اما به منظور مشخص کردن نام هر یک از طبقه‌ها باید اطلاعات زمینی از این طبقه‌ها موجود باشد. استفاده از تصویر طبقه‌بندی شده زیر به همراه اطلاعات زمینی موجود از منطقه، شناسایی و طبقه‌بندی قسمت‌های سطحی مختلف یخچال را ممکن می‌سازد.

#### ۴-۲- تفسیر بصری

یکی دیگر از روش‌های استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از تفسیر بصری تصاویر است. در این روش، با استفاده از اطلاعات مربوط به ویژگی‌های طیفی (تن رنگی یا سیاه و سفید عوارض)، ویژگی‌های مکانی (شکل هندسی، سایه، بافت، پترن (الگو) و موقعیت عوارض) و همچنین

### نتیجه‌گیری

در بررسی‌های انجام شده که بر روی یخچال‌های طبیعی در دنیا، روش‌های مختلفی برای نقشه‌برداری از یخچال‌های طبیعی و تعیین اجزا و تشریح آنها به کار رفته، از آن جمله می‌توان روش‌های فتوگرامتری هوایی، فتوگرامتری فضایی، نقشه برداری ژئودتیک و روش‌های ترکیبی را نام برد.

در این تحقیق روش مطالعه یخچال طبیعی علم چال و یخچال‌های دیگر موجود در ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای معرفی و قابلیت تصاویر مختلف برای استخراج عوارض مختلفی از یخچال طبیعی مشخص شد. در جدول ۳، نتایج این بررسی و مطالعه و امکان دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در مطالعات یخچال طبیعی علم چال به صورت خلاصه ارائه شده است.

به منظور بررسی یخچال طبیعی علم چال از نظر اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی (پیشروی یا پسروی یخچال)، باید از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا استفاده کرد، زیرا یخچال علم چال نسبت به یخچال‌های کوهستانی موجود در کشورهای دیگر، کوچک بوده و به منظور کشف میزان جابه‌جایی آن باید از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا در طی بازه‌های زمانی مختلف استفاده شود.

به منظور بررسی سطح یخچال از تصاویر چند طیفی موجود در این تحقیق، اطلاعات زیادی نمی‌توان استخراج کرد، زیرا سطح یخچال پوشیده از یخرفت‌های ریز و درشت و خاک می‌باشد و الگوریتم‌های معمولی طبقه‌بندی، قادر به استخراج کامل و بهینه یخچال طبیعی نیستند. اگر چه قابلیت تصاویر فراطیفی (HyperSpectral) در این مطالعات باید مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین به کارگیری تصاویر رادار برای استخراج اطلاعات در زمینه فرایند ذوب یخ یخچالی و دینامیک ذوب یخچال باید بررسی شود.

در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ تعدادی از عوارض مهم یخچالی که بر روی تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی بودند، نشان داده شده است.

در این مرحله با استفاده از مشاهدات میدانی، عکسبرداری از عوارض و به دست آوردن مختصات و موقعیت عوارض مختلف یخچالی نظیر یخرفت‌ها، شکاف یخچالی و... این عوارض بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی و مقایسه شده و قابلیت تصاویر مختلف به منظور استخراج عوارض یخچالی مورد مطالعه قرار گرفت.

### ارزیابی نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای

در این مرحله، تصاویر ماهواره‌ای زمین مرجع شده با برداشت‌های میدانی از منطقه یخچالی علم چال مقایسه شده و عوارض خاص یخچال علم چال بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شدند. همچنین با استفاده از نقاط GPS برداشت شده، موقعیت عوارض بر روی تصویر ماهواره‌ای با مختصات برداشت شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی مقایسه شد. با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و همچنین به کارگیری مشاهدات زمینی، قابلیت تصاویر ماهواره‌ای برای استخراج عوارض مختلف یخچال علم چال مشخص شد. در شکل‌های زیر مقایسه نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و برداشت‌های صورت گرفته توسط GPS مشاهده می‌شود. با توجه به شکل‌ها، می‌توان دقت استخراج اطلاعات به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای را مشاهده کرد. در شکل ۱۰، محدوده یخچال که در دو مرحله برداشت و بر روی تصویر ماهواره‌ای قرار داده شده مشاهده می‌شود. شکل ۱۱، محدوده یخرفت برداشت شده با GPS را بر روی تصویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد.

در جدول ۲ نتایج بررسی و مطالعه تصاویر ماهواره‌ای موجود و امکان استخراج عوارض یخچالی از روی تصاویر ماهواره‌ای و دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در مطالعات یخچال طبیعی علم چال نشان داده شده است.

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

ماهواره	اندازه پیکسل زمینی [m]	قدرت تفکیک طیفی	قدرت تفکیک رادیومتری	تاریخ اخذ تصویر
SPOT5	۲/۵	Pan	۸ بیت	شهریور ۸۳
IRS-1C IRS-1D	۵/۸ pan ۲۳/۵ ms	Pan Mss	۶ بیت	خرداد ۸۲
TERRA- ASTER	۱۵ VNIR	Mss	۸ بیت	مرداد ۸۱
Landsat7	۱۵ ۳۰ ۶۰ TIR	Pan Mss	۸ بیت	شهریور ۸۱
<b>نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی</b>				
نقشه رقومی با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ و عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۴۰,۰۰۰				

جدول ۲- نتایج به دست آمده از بررسی تصاویر ماهواره‌ای

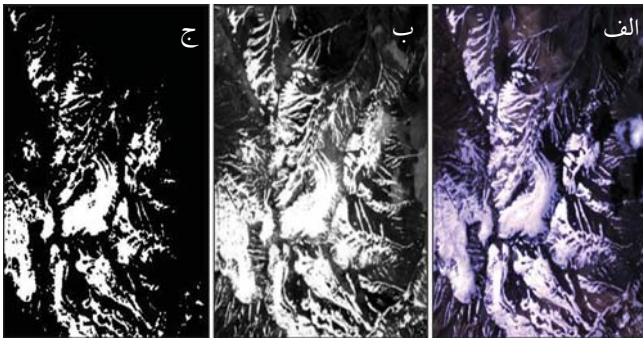
جدول ۳- نتایج بررسی و مطالعه تصاویر ماهواره‌ای موجود و امکان دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در مطالعات یخچال طبیعی علم چال

نوع تحلیل	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک طیفی	قدرت تفکیک راداری
شناسایی یخچال	۱۵ متر	چند طیفی	۸-۶ بیت
بررسی وضعیت تغذیه یخچال (برآورد سطح برف در کاسه یخگیر)	۱۵-۳۰ متر	چند طیفی	۸ بیت
کشف عوارض موجود بر روی یخچال	۲/۵ متر	پانکروماتیک	۸-۶ بیت، برای شناسایی عوارض واقع در سایه قدرت تفکیک ۸ بیت و بالاتر
تحلیل عوارض	کمتر از ۲/۵ متر در حد ۱ متر و زیر ۱ متر	پانکروماتیک و چند طیفی	۸-۶ بیت، برای شناسایی عوارض واقع در سایه قدرت تفکیک ۸ بیت و بالاتر
اندازه‌گیری حرکت یخچال (پسروی و پیشروی)	کمتر از ۲/۵ متر در حد ۱ متر در چند بازه زمانی	پانکروماتیک	۸-۶ بیت

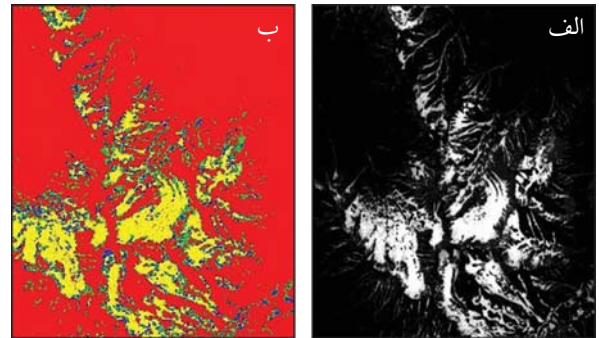
چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۱ متر		تصویر قابل استفاده
نوع پردازش	سطح استخراج اطلاعات	عارضه
بصری	کشف	آسیاب یخچالی
بصری	تشخیص	ایوان های یخرودی
بصری	تشخیص	رودخانه یخچالی
بصری	تشخیص	کفچه ها
پانکروماتیک یا چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ متر		تصویر قابل استفاده
نوع پردازش	سطح استخراج اطلاعات	عارضه
بصری	تحلیل فنی	پشته های یخرودی
رقومی- بصری	کشف	حفره های انحلالی
بصری	کشف	خاکه های یخچالی
از تصاویر رادار یا تصاویر نوری با قدرت تفکیک بالا		خط تعادل
بصری	شناسایی	دشت های برون شستی
بصری	شناسایی	ریمای یخچالی
بصری	تشخیص	رشته های یخرفتی
بصری	شناسایی	یخرفت
پانکروماتیک یا چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی ۱۵-۳۰ متر		تصویر قابل استفاده
نوع پردازش	سطح استخراج اطلاعات	عارضه
رقومی	شناسایی	پیشانی یخچال
رقومی	تحلیل فنی	خط برف
رقومی	شناسایی با استفاده از تصویر ماهواره‌ای و DEM	دره یخچالی
رقومی	تشخیص	زبانہ های یخچالی
رقومی	تحلیل فنی شناسایی با استفاده از تصویر ماهواره‌ای و DEM	سیرک یخچالی
رقومی	شناسایی	میدان های یخچالی
رقومی	شناسایی	ناوہ های یخچالی
رقومی	شناسایی	یخچال طبیعی



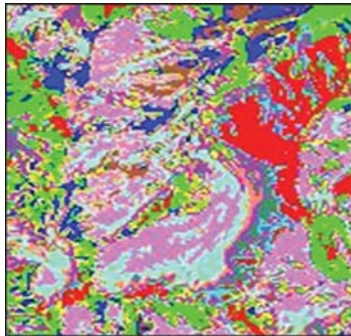
شکل ۱- پراکندگی یخچال‌های منطقه علم چال.



شکل ۳- تصویر به دست آمده از نتیجه NDSI، الف) ترکیب رنگی ۳۲۱ لندست ۷، ب) نتیجه NDSI، ج) اعمال حد آستانه مناسب به NDSI و استخراج محدوده یخچال.



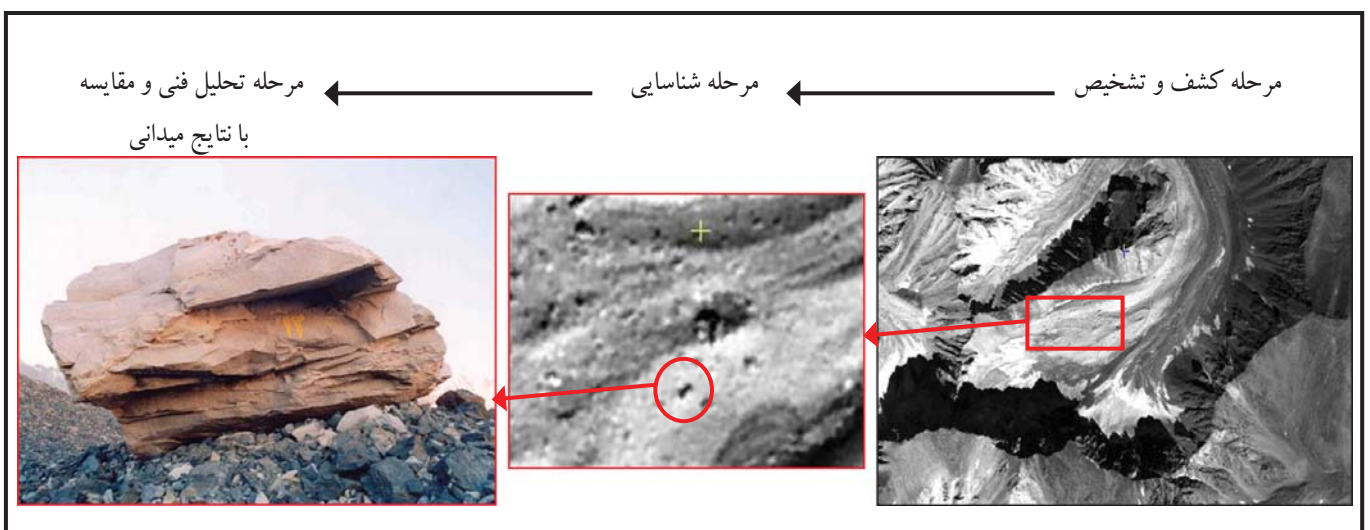
شکل ۴- الف) نتیجه حاصل از اعمال نسبت باند ۳ به ۵ سنجنده لندست ب) اعمال حد آستانه مناسب به نتیجه نسبت دو باند، مناطق سرخ رنگ غیر برف و یخ، زرد و آبی برف و یخ.



شکل ۵- طبقه‌بندی تصویر لندست ۷ سطح یخچال علم چال با استفاده از طبقه‌بندی نظارت نشده

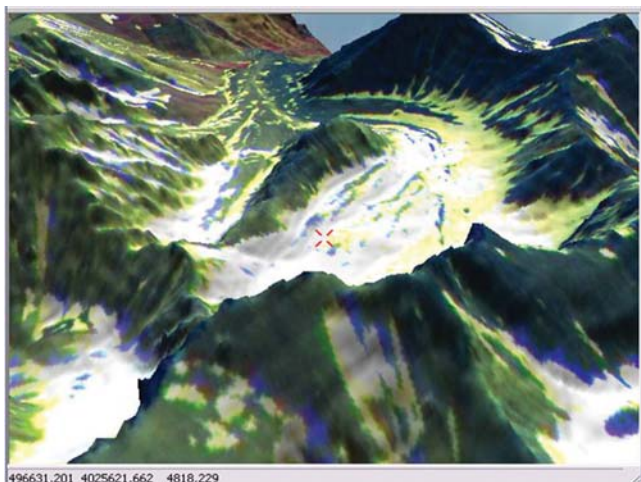


شکل ۴- نتیجه حاصل از طبقه‌بندی تصویر لندست ۷ با استفاده از طبقه‌بندی نظارت نشده، رنگ سبز منطقه غیر یخچال، رنگ سفید یخچال طبیعی (برف و یخ)



شکل ۶- نمایش مراحل مختلف تفسیر تصویر ماهواره‌ای SPOT5

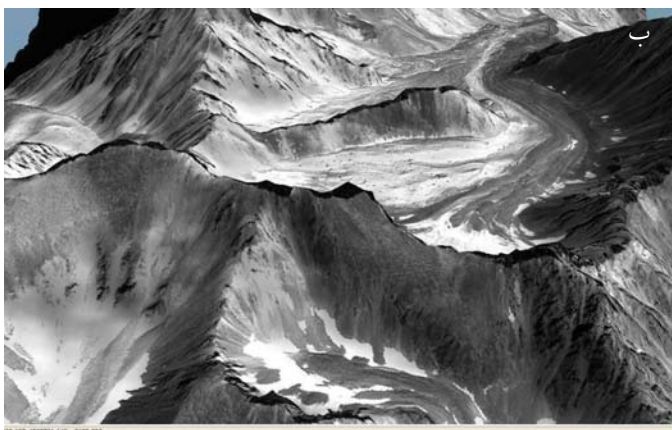




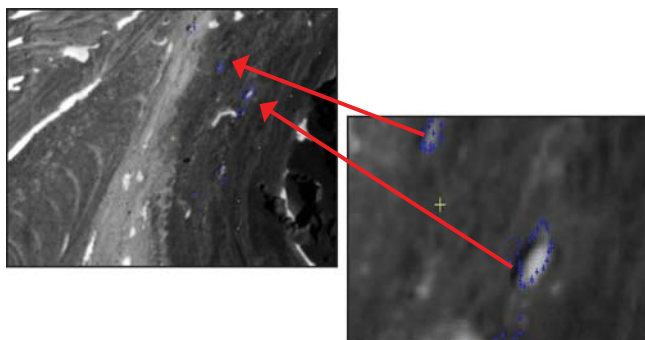
شکل ۸- مدل سه‌بعدی یخچال، تصویر تلفیقی IRS (دید از قله علم کوه)



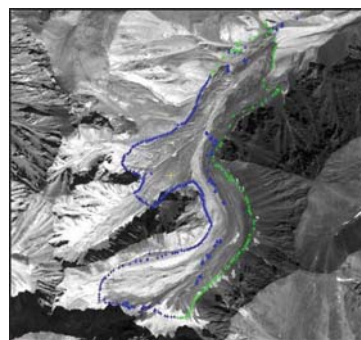
شکل ۷- شناسایی شکاف طولی یخچال بر روی تصویر ماهواره‌ای SPOT5



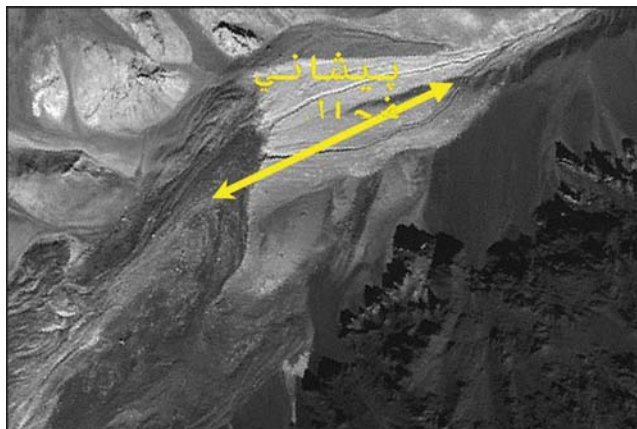
شکل ۹- مدل سه‌بعدی یخچال، تصویر SPOT5 (الف: دید از پیشانی یخچال - ب: دید از قله)



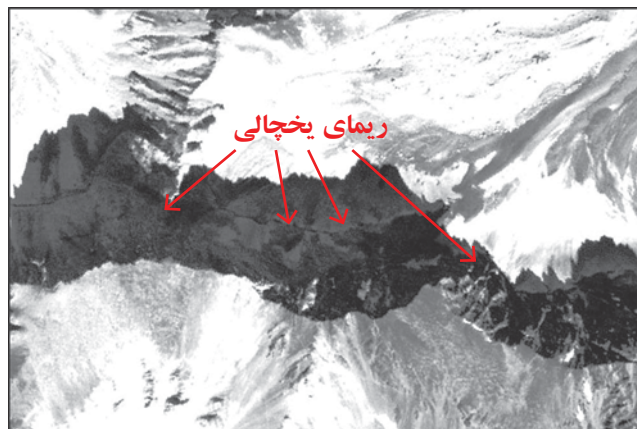
شکل ۱۱- محدوده یخرفت که با GPS برداشت شده و خود یخرفت بر روی تصویر SPOT 5



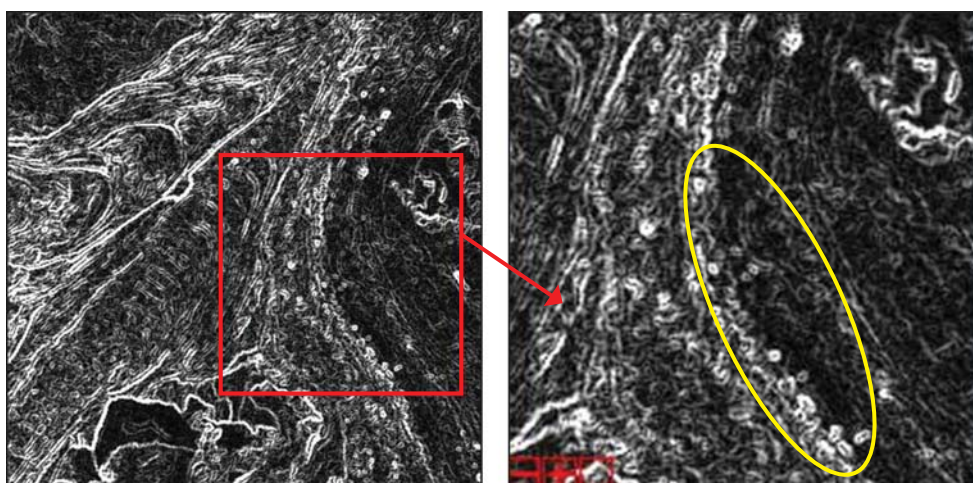
شکل ۱۰- برداشت‌های دو مرحله با استفاده از GPS شامل محدوده یخچال و یخرفت‌ها بر روی تصویر SPOT 5



شکل ۱۲- نمایی از پیشانی یخچال و کشیدگی آن به علت وجود اختلاف ارتفاع (تصویر SPOT 5)



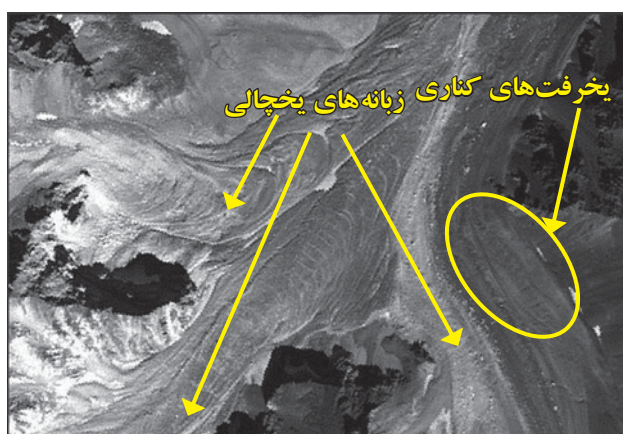
شکل ۱۳- شناسایی ریمای یخچالی بر روی تصویر SPOT 5



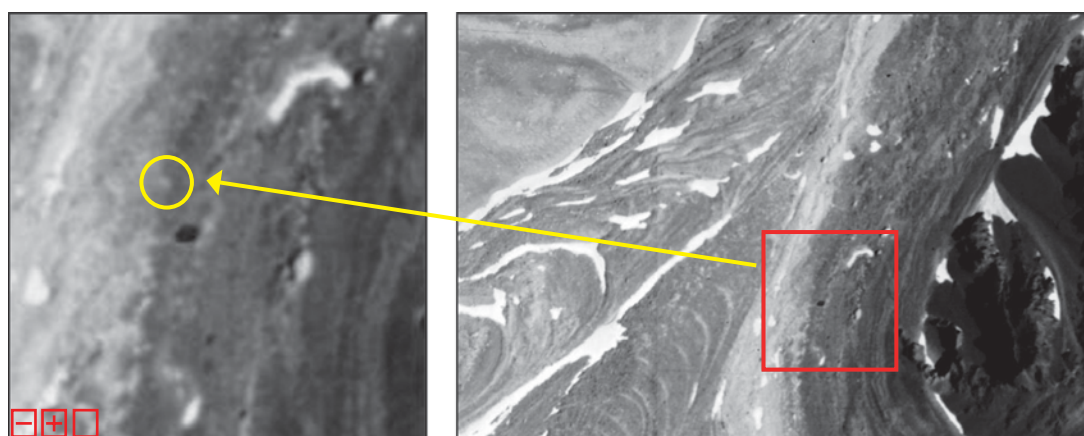
شکل ۱۴- آشکار سازی یخرفت‌های کناری با استفاده از اپراتور مشتق گیر Sobel



شکل ۱۵- شناسایی یخرفت های میانی و رشته های یخرفتی بر روی تصویر SPOT 5



شکل ۱۶- شناسایی زبانه یخچالی و یخرفت های کناری بر روی تصویر SPOT 5



شکل ۱۷- شناسایی دریاچه های یخچالی بر روی ارتوفتو تولید شده



### کتابنگاری

- رضایی، ی.، ۱۳۸۳- بررسی یخچال طبیعی زردکوه بختیاری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد عزیز، ع.، ۱۳۶۴- علم کوه ( منطقه تخت سلیمان)
- وزیری، ف.، ۱۳۷۹- هیدرولوژی کاربردی در ایران، کتاب دوم (شناخت آب‌های سطحی در ایران) شناسایی مقدماتی یخچال‌های طبیعی
- یمانی، م.، ۱۳۸۱- ژئومورفولوژی یخچال‌های علم چال، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۲

### References

- Bayr, K. J., Hall, D. K. & Kovalick, W. M., 1994 - Observations on glaciers in the eastern Austrian Alps using satellite data, International Journal of Remote Sensing, 15, 1733 – 1742
- Civil NIIRS, 1996- Prepared By the Imagery Resolution Assessments and Reporting Standards (IRARS) Committee, 1996 GLIMS algorithm working group, GLIMS algorithm document, 2002
- Kääb, Huggel, C., Paul, F., Wessels, R., Raup, B., Kieffer, H. & Kargel, J. (in press): Glacier Monitoring from ASTER Imagery: Accuracy and Applications. EARSeL Proceedings. LIS-SIG Workshop. Berne, March 11-13, 2002
- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T. & Haeberli, W., 2002- The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. Annals of Glaciology. 34. 355-361