



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال نهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶  
Vol.9, No. 1, Spring 2017

۱-۱۶

## اندازه‌گیری تغییرات سطحی و سرعت حرکت یخچال علم‌چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی

یوسف رضائی<sup>۱\*</sup>، محمدجواد ولدان زوج<sup>۲</sup>، محمودرضا صاحبی<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۲/۱۴



### چکیده

یخچال‌های طبیعی و تغییرات و حرکت آنها در جایگاه شاخص‌هایی برای نشان دادن تغییرات آب‌وهوایی به کار می‌روند و به منظور ارزیابی تغییرات سطحی یخچال ناشی از تغییرات اقلیمی، باید مطالعات بلندمدت انجام شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راهی مؤثر برای استخراج سرعت حرکت یخچال محسوب می‌شود. در این تحقیق با استفاده از عکس‌های هوایی قدیمی و تصاویر ماهواره‌ای جدید، تغییرات سطحی و بردارهای جابه‌جایی و سرعت یخچال علم‌چال، با استفاده از الگوریتم خودکار، محاسبه شده است. تمامی داده‌ها، شامل عکس‌های هوایی و تصاویر، به صورت ارتو<sup>۱</sup> درآمدند و از نظر رادیومتریکی و هندسی همسان‌سازی شدند. با استفاده از عکس‌های سال ۱۹۵۵ و مقایسه آن با تصویر SPOT سال ۲۰۰۳، میزان عقب‌نشینی یخچال در قسمت پیشانی آن به دست آمد. همچنین، تغییرات کوتاه‌مدت در دو بازه زمانی بین ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۳ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر SPOT و Quick Bird، استخراج شد. در این تحقیق، با استفاده از روش مبتنی بر تبدیل فوریه و محاسبه همبستگی، بردارهای سرعت سطحی با خطای کمتر از دو متر استخراج شد. نتایج دقت و قابلیت روش پیشنهادی را برای ارزیابی میزان عقب‌نشینی و نیز اندازه‌گیری سرعت سطحی یخچال نشان می‌دهند و می‌توان این نتایج را به منظور مطالعات مربوط به تغییرات اقلیمی در سطح منطقه‌ای به کار برد.

**کلیدواژه‌ها:** یخچال طبیعی، عکس‌های هوایی، تصاویر با قدرت تفکیک بالا، همبستگی مکانی، تبدیل فوریه.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه عمران تلفن: ۰۸۱۳۸۲۹۲۵۰۵

## ۱- مقدمه

برف در مناطقی که از نظر شرایط محیطی و جوی مستعد تشکیل یخچال طبیعی‌اند انباشته و بر اثر سه عامل مهم درجه حرارت خورشید، تصعید و اثر فشار فزاینده دچار دگرگونی پیچیده می‌شود. طی این فرایند، یخ یخچالی شکل می‌گیرد (ولدان زوج و همکاران، ۱۳۸۷). یکی از ویژگی‌های یخچال‌ها توانایی آنها در جریان یافتن است که با ویژگی‌های یخ مقذور می‌شود. یخ، مانند بسیاری از جامدات دیگر، در شرایط خاصی به صورت خمیری درمی‌آید و شروع به حرکت می‌کند. این شرایط به دما و فشار ارتباط دارد و این ویژگی در توده‌های عظیم یخ یخچال‌ها در حوضه‌های برفگیر دائمی مشهود است. یخ قسمت پایین‌تر، که در معرض فشار لایه‌های بالایی است، در بیشترین درجه حالت خمیری به حرکت درمی‌آید (Barnes & Tabor, 1969).

روش‌های متفاوتی برای ارزیابی و بررسی تغییرات در یخچال‌ها به کار گرفته شده است که مهم‌ترین آنها روش میدانی، شامل استفاده از روش نقشه‌برداری زمینی و کارهای میدانی است (یمانی، ۱۳۸۸). اما استفاده از این روش به تنهایی، با توجه به مشکلات و سختی‌های کار میدانی و هزینه آن، امکان‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه نیست. فناوری سنجش از دور و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین تغییرات و جابه‌جایی عوارض، افزون‌بر کمک به استخراج سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر تغییرات عوارض مکان مرجع، امکان ذخیره‌سازی و به‌هنگام‌رسانی و بازیابی اطلاعات به صورت رقومی را میسر می‌کند.

به منظور آشکارسازی تغییرات با استفاده از تصاویر نوری چندزمانه، روش‌های متعددی وجود دارند که معمولاً بر پایه الگوریتم‌های تناظریابی‌اند. این تصاویر می‌توانند عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای یا تصاویری باشند که با هواپیماهای بدون سرنشین گرفته شده‌اند (Bhardwaj, Sam et al., 2016). تناظریابی در واقع یافتن پیکسل‌ها یا نقاط متناظر در دو تصویر است. در این عمل، ابتدا مجموعه‌ای نقاط مشخص را

ورودی تناظریابی در نظر می‌گیریم و سپس نقاط متناظر در تصویر بعدی جستجو و مشخص می‌شود. پس از آن، مختصات نقاط متناظر را محاسبه و در نهایت، کیفیت تناظریابی را کنترل و ارزیابی می‌کنیم. تناظریابی سطح مبنا براساس همبستگی یکی از روش‌های تناظریابی است (Berthier et al., 2005). استفاده از محاسبه تابع همبستگی بین عکس‌های هوایی یا تصاویر ماهواره‌ای دریافت‌شده از عارضه در دو بازه زمانی را محققان گوناگونی به کار برده‌اند (Aizen et al., 2007; Haerberli et al., 2007; Dirk Scherler et al., 2008; Copland et al., 2009; Min Wang et al., 2009; Heid, 2011; Dehecq et al., 2015). روش، یکی از تصاویر را مرجع (تصویری که در ابتدای دوره زمانی گرفته شده است) و تصویر دیگر را تصویر هدف در نظر می‌گیریم. اطراف هر نقطه در تصویر مرجع پنجره‌ای به مرکز آن نقطه، با عنوان پنجره مرجع، ایجاد می‌کنیم. یک پنجره هدف در تصویر دوم را با همان اندازه پنجره مرجع، در محدوده‌ای به نام «سطح جستجو»، جابه‌جا می‌کنیم و به‌ازای هر موقعیتی که پنجره هدف در سطح جستجو قرار می‌گیرد، میزان همبستگی آن با پنجره مرجع را محاسبه می‌کنیم (Berthier et al., 2005). اگر پیکسل مرکزی پنجره مرجع در محل  $(x, y)$  و پیکسل مرکزی پنجره هدف با بیشینه همبستگی در محل  $(x', y')$  باشد، جابه‌جایی پیکسلی بین دو تصویر از اختلاف این دو موقعیت حاصل می‌شود. با توجه به ماهیت گسسته تصاویر رقومی، میدان جابه‌جایی محاسبه‌شده در این مرحله در حد پیکسل است. برای رسیدن به میدان جابه‌جایی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، می‌توان از الگوریتم‌های گوناگون درونیابی استفاده کرد (Leprince et al., 2007).

روش همبستگی متقابل نرمال‌شده<sup>۱</sup> از نخستین روش‌هایی بود که در محاسبه سرعت حرکت یخچال‌های طبیعی استفاده شد (Bindschadler &

1. normalized cross-correlation

ماهواره‌ای نوری و عکس‌های هوایی است. با توجه به مشکلات موجود در روش‌های میدانی اندازه‌گیری حرکت یخچال، در این تحقیق از روش سنجش از دور استفاده می‌شود. بدین‌منظور، یک روش همبستگی وزن‌دار در حوزه فرکانس به کار می‌رود که همراه با همسان‌سازی رادیومتریکی است. پرسش‌های مهم در این تحقیق شامل بررسی وضعیت تغییرات پیشانی یخچال علم‌چال و شیوه حرکت و تغییرات سطحی یخچال در بازه‌های زمانی بلندمدت (چند دهه) و کوتاه‌مدت (چند ساله) است. یکی دیگر از پرسش‌های این تحقیق امکان استفاده از الگوریتمی خودکار برای استخراج بردارهای جابه‌جایی در سطح یخچال است. با دسترسی به مجموعه داده‌های چندزمانه در این تحقیق، تغییرات پیشانی یخچال و همچنین میدان جابه‌جایی و سرعت در قسمت‌های متفاوت یخچال علم چال به صورت خودکار استخراج می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، منطقه یخچالی مورد مطالعه با هدف آشکارسازی تغییرات- یخچال علم‌چال، واقع در قسمت شمالی قله علم‌کوه در منطقه تخت سلیمان است (شکل ۱). قله علم‌کوه، با ارتفاع ۴۸۲۲ متر از سطح دریا در موقعیت جغرافیایی عرض  $22^{\circ} 36'$  شمالی و طول جغرافیایی  $57^{\circ} 50'$  شرقی، دومین ارتفاع ایران محسوب می‌شود. پستی‌وبلندی‌های فراوان و به‌ویژه رشته‌کوه مجزای هفت‌خوان، با هفت قله، با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر از سطح دریا و نیز برودت به‌نسبت زیاد، به‌علت اغتشاش‌های جوی و طوفان‌های با سرعت زیاد، سبب شده است که چند یخچال طبیعی تقریباً مهم (البته مهم به‌لحاظ قرارگرفتن آنها در منطقه‌ای نیمه‌خشک، مانند ایران) شکل بگیرند (Moussavi et al., 2010).

(Scambos, 1991). بدین‌منظور، برنامه‌ای به نام IMCORR توسعه داده شده است که در بسیاری از مطالعات دیگر در زمینه تعیین سرعت حرکت یخچال‌های طبیعی نیز به کار رفت (Berthier et al., 2003; Copland et al., 2009; Dowdeswell & Benham, 2003; Skvarca et al., 2003). برای یخچال‌های طبیعی که از برف پوشیده شده‌اند و قطعات سنگی که داخل برف وجود دارند و با حرکت یخچال آنها نیز حرکت می‌کنند، این روش می‌تواند عملیات تطابق را به خوبی انجام دهد و نتایج مطلوبی داشته باشد (Bindschadler and Scambos, 1991). همچنین، محاسبه ضریب همبستگی می‌تواند به صورت وزنی انجام شود که در آن مقادیر وزن، از پیکسل مرکزی به سمت پیکسل‌های بیرونی، کمتر می‌شود. در این روش، از میان تمامی مقادیر همبستگی‌های محاسبه‌شده، بیشترین مقدار که مربوط به مشابه‌ترین پنجره هدف با پنجره مرجع است به‌منزله منطقه متناظر ثبت می‌شود. محاسبه همبستگی در حوزه فرکانس نیز ممکن است و سرعت آن را افزایش می‌دهد. بدین‌منظور، از تبدیل فوریه (FFT) استفاده می‌شود (McClellan et al., 2003). محاسبه همبستگی در حوزه فرکانس نیز همانند محاسبه در حوزه مکان است. تنها تفاوت این است که در حوزه فرکانس، نرمالیزاسیون را نمی‌توان به‌سادگی انجام داد و در روش CCF<sup>۱</sup>، فقط می‌توان همبستگی<sup>۲</sup> را محاسبه کرد. این بدین‌معناست که تفاوت نور صحنه تصویربرداری در دو تصویر ممکن است خطایی در محاسبه همبستگی پدید آورد و نیز تطابق اشتباه بین عوارض به‌وجود آید (Heid, 2011). بنابراین، همسان‌سازی (نرمالیزاسیون) رادیومتریکی تصاویر یکی از مراحل مهم در محاسبه ضریب همبستگی به‌شمار می‌رود.

طبق اینکه تغییرات سطحی یخچال‌های طبیعی نشان‌دهنده حرکت یخچال و همچنین تغییر در ذخایر یخی آنهاست، هدف از این تحقیق آشکارسازی تغییرات سیمای یخچال طبیعی علم‌چال، با استفاده از تصاویر

1. cross-correlation in frequency domain

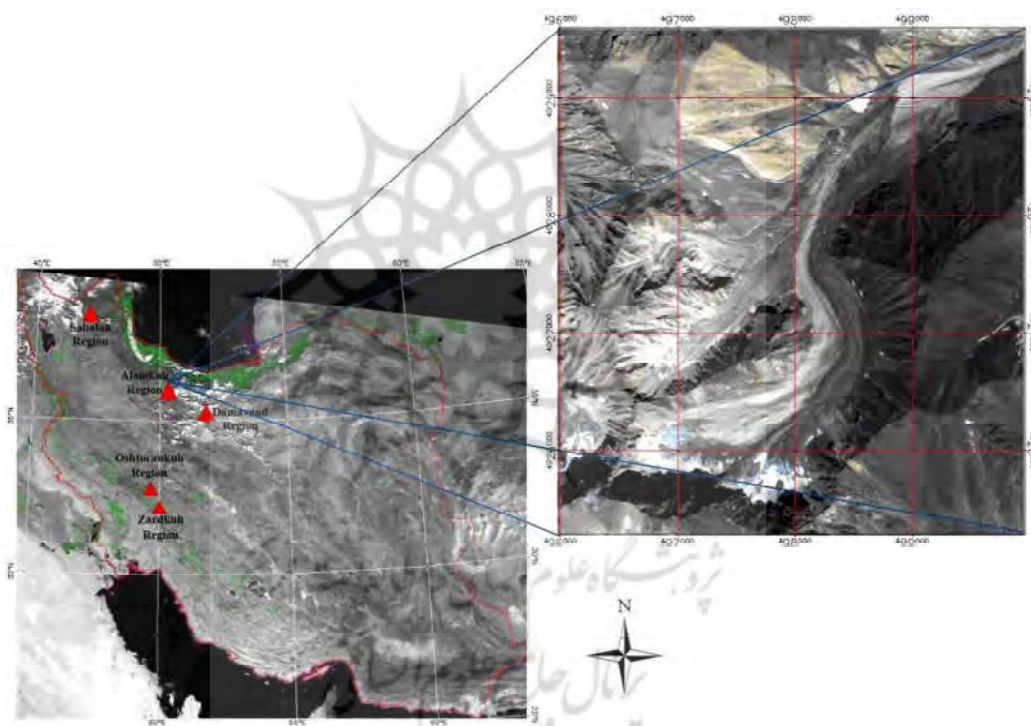
2. cross-correlation

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، برای آشکارسازی تغییرات یخچال علم‌چال، از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا و عکس‌های هوایی موجود از این منطقه در بازه‌های زمانی متفاوت استفاده شده است. با توجه به الگوریتم آشکارسازی تغییرات سطحی یخچال، تصاویر ماهواره‌ای باید ویژگی‌هایی داشته باشند. برای نمونه، این تصاویر باید در فصل خشک، از تیرماه تا شهریورماه، دریافت شده باشند تا بتوان از آنها برای ارزیابی تغییرات رخ داده در سطح یخچال استفاده کرد. پیش از تیرماه، به دلیل

پوشش برفی از زمستان گذشته، ارتفاع خط برف (SLA)<sup>۱</sup> همچنان پایین است و این سبب پوشیده شدن عوارض سطحی می‌شود. پس از شهریورماه نیز، بارش برف در ارتفاعات پایین آلبیدو سطح یخچال را افزایش چشمگیری می‌دهد (Aizen et al., 2007).

مجموعه داده‌های مورد استفاده برای آشکارسازی تغییرات یخچال علم‌چال در جدول ۱ مشاهده می‌شود. عکس‌های هوایی مربوط به سال ۱۹۵۵ کاغذی بودند. این عکس‌ها با دقت ۲۵ میکرون اسکن و به فایل رقومی تبدیل شدند.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه، یخچال طبیعی علم‌چال، واقع در رشته‌کوه‌های تخت سلیمان

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده برای آشکارسازی تغییرات یخچال علم‌چال

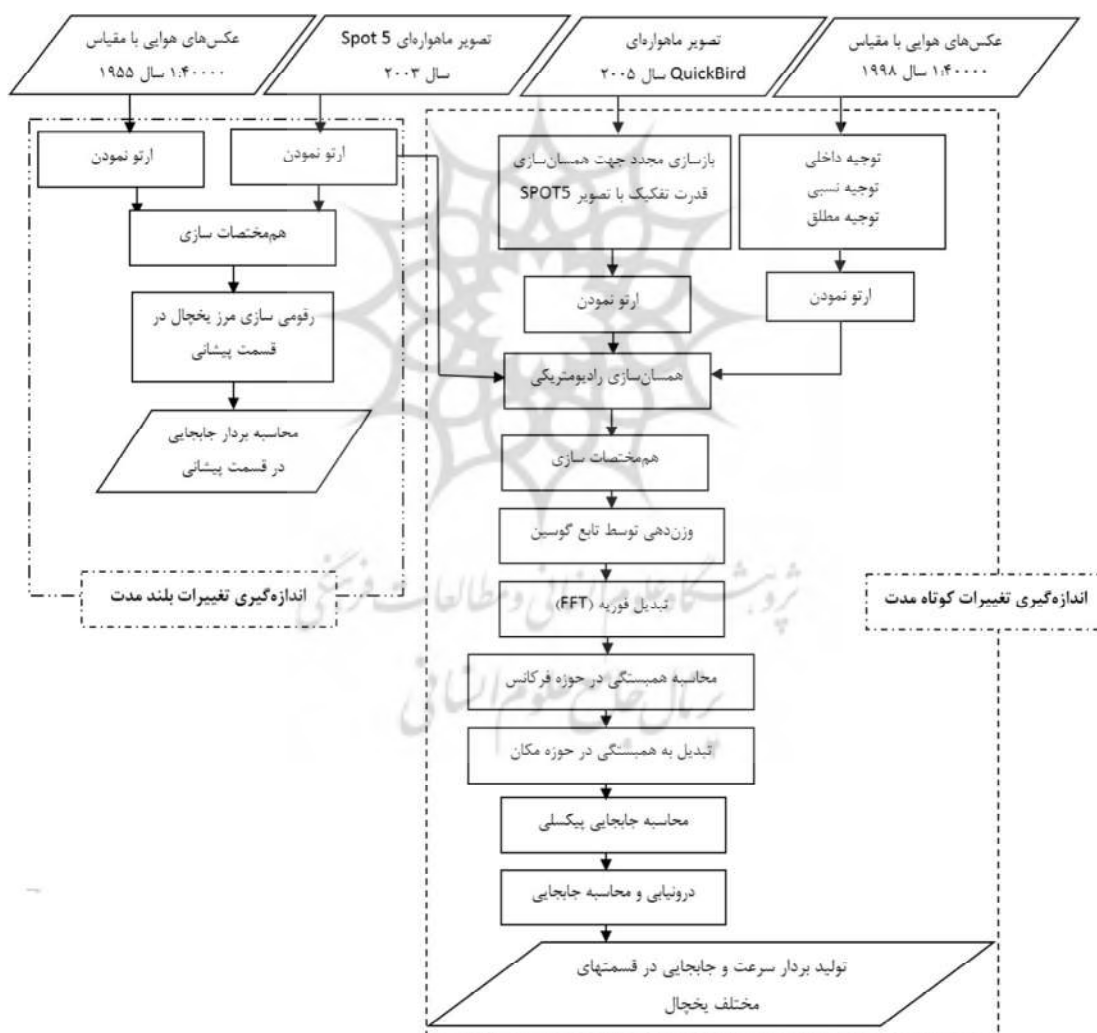
نوع داده	زمان دریافت	مقیاس	قدرت تفکیک مکانی
عکس هوایی	۱۹۹۸	۱/۴۰۰۰۰	-----
عکس هوایی	۱۹۵۵	۱/۴۰۰۰۰	-----
تصویر ماهواره‌ای پانکروماتیک SPOT 5	۲۰۰۳	-----	۲/۵ متر
تصویر ماهواره‌ای پانکروماتیک Quick Bird	۲۰۰۵	-----	۶۰ سانتی‌متر

1. snow-line altitude

### ۲-۳- الگوریتم پیشنهادی

اعمال هر نوع الگوریتم روی تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی موجود، پیش‌پردازش‌هایی صورت گیرد. نخست، باید ابعاد پیکسل تصاویر همسان شود. همسان‌سازی رادیومتریکی نسبی تصاویر چندزمانه و هم‌مرجع کردن آنها از مراحل بعدی پیش‌پردازش‌هاست. در این تحقیق، آشکارسازی تغییرات سطحی یخچال علم‌چال در دو حالت بلندمدت و کوتاه‌مدت بررسی شده است. در شکل ۲، مراحل گوناگون اجرایی انجام‌شده در این تحقیق نشان داده شده است.

با استفاده از تصاویر نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا که از منطقه یخچالی در زمان‌های متفاوت گرفته شده‌اند، می‌توان حرکت یخچال و جابه‌جایی سطحی آن را سنجید. این کار با مقایسه تصاویر دریافت‌شده از منطقه، در زمان‌های متفاوت، با استفاده از الگوریتم‌های پیکسل‌مبنا امکان‌پذیر است ولی پیش‌نیاز استفاده از این الگوریتم‌ها داشتن تصاویر با ویژگی‌های هندسی و رادیومتریکی یکسان است. بنابراین، لازم است پیش از



شکل ۲. مراحل کلی اجرایی آشکارسازی تغییرات سطحی یخچال علم‌چال در بازه بلند و کوتاه‌مدت

هم‌مختصات شد. به‌منظور دستیابی به دقت بالا، توابع رشنال<sup>۳</sup> در عملیات تصحیح هندسی به کار رفت.

### ۲-۳-۳- آشکارسازی تغییرات سطحی سیمای

#### یخچال طبیعی علم‌چال

تغییرات رخ داده در یخچال طبیعی را می‌توان به دو صورت، الف) تغییرات به‌وجودآمده در بازه طولانی و تغییرات بلندمدت؛ ب) تغییرات اتفاق افتاده در بازه کوتاه و تغییرات کوتاه‌مدت، بررسی کرد. در این تحقیق، با توجه به داده‌های موجود و گردآوری شده از منطقه یخچالی علم‌چال، امکان بررسی دو نوع تغییرات رخ داده وجود داشت که در ادامه به این دو بخش خواهیم پرداخت.

#### • بلندمدت

به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات یخچال در بازه‌های طولانی، می‌توان از تصاویر و عکس‌های هوایی که در سال‌های پیش تهیه شده و مقایسه آنها با تصاویری که به‌تازگی از منطقه یخچالی گرفته شده است استفاده کرد. در این تحقیق، با توجه به اینکه عکس‌های هوایی سال ۱۹۵۵ از این منطقه در دسترس بود، میزان تغییرات یخچال در بازه زمانی ۱۹۵۵ (۱۳۳۴ ه.ش.) تا ۲۰۰۳ (۱۳۸۲ ه.ش.) مطالعه شد. پس از عملیات هم‌مختصات کردن تصاویر، با دقت کسری از پیکسل، مرز پیشانی یخچال به‌صورت دستی رقمی شد. پس از رقمی کردن مرز یخچال در دو تصویر، این دو لایه با هم مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، مرز بالایی پیشانی یخچال در سال ۲۰۰۳ با خط سبز و مرز بالایی پیشانی یخچال در سال ۱۹۵۵ با نقطه چین قرمز نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد

### ۲-۳-۱- همسان‌سازی رادیومتریکی نسبی تصاویر چندزمانه

برای همسان‌سازی رادیومتریکی تصاویر، از روش مطرح‌شده یانگ دو<sup>۱</sup> (2002) استفاده شده است. در این روش، مجموعه‌ای عوارض ثابت در طول زمان در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از این عوارض، هر دو تصویر به یک سطح رادیومتریکی مرجع انتقال داده می‌شوند. انتخاب این عناصر به‌صورت آماری است و با استفاده از مقادیر این پیکسل‌ها، رابطه خطی بین تصاویر چندزمانه از منطقه‌ای مشخص می‌شود، ضرایب نرمال‌سازی محاسبه و روی دو تصویر اعمال می‌شود و از این طریق، به‌لحاظ رادیومتریکی، همسان می‌شوند.

### ۲-۳-۲- هم‌مختصات‌سازی تصاویر

پس از نرمالیزاسیون رادیومتریکی، هم‌مختصات‌سازی تصاویر از پیش‌نیازهای اساسی الگوریتم آشکارسازی تغییرات به‌شمار می‌رود. نخست، با استفاده از شش عکس هوایی با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ از منطقه که با اسکتر با پیکسل سایز ۲۵ میکرون رقمی شده بودند، مدل سه‌بعدی منطقه تهیه شد. عکس‌های مورد استفاده در دو رن پرواز بوده که هر رن دارای سه عکس بوده است؛ بنابراین در هر رن، دو مدل بدست آمده و پس از آن مدل ارتفاعی منطقه (DEM)<sup>۲</sup> تولید شد. پس از تهیه DEM، ارتوفتوی هر کدام از مدل‌ها نیز تهیه گردید. درنهایت، با استفاده از این ارتوفتوها موزائیک تصویری منطقه به‌دست آمد.

با استفاده از ارتوفتوی موزائیک‌شده منطقه، تصویر SPOT 5 منطقه یخچالی با استفاده از دوازده نقطه کنترل و با انتخاب چهارده نقطه چک مستقل، با دقت ۰/۵ پیکسل تصحیح هندسی و هم‌مختصات شد. تصویر Quick Bird نیز با تصویر SPOT 5، با نوزده نقطه کنترل و چهارده نقطه چک مستقل و دقت RMSE کلی ۰/۸۵، هم‌مختصات شد. همچنین عکس هوایی رقمی‌شده سال ۱۹۵۵ نیز، با تصویر SPOT 5، با ۲۹ نقطه کنترل و ۱۴ نقطه چک مستقل و دقت RMSE کلی ۰/۶۱

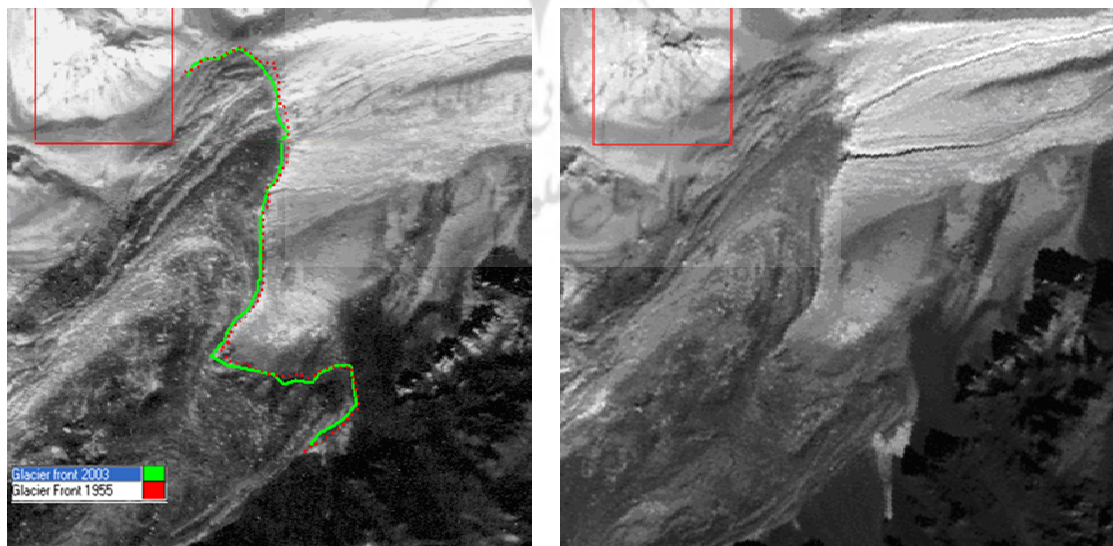
1. Yong Du  
2. digital elevation model  
3. Rational

• کوتاه‌مدت

با توجه به داده‌ها از منطقه یخچالی در روش اندازه‌گیری تغییرات کوتاه‌مدت، تصاویر ارتسوی تولیدی از عکس‌های هوایی، تصویر SPOT 5 و Quick Bird مقایسه شدند. به‌منظور ارزیابی تغییرات رخ داده روی این تصاویر، پس از همسان‌سازی رادیومتریکی و هم‌مختصات کردن تصاویر، از روش همبستگی تصاویر استفاده شد. باید توجه داشت که میزان جابه‌جایی محاسبه‌شده نقاط به‌روش همبستگی تصاویر رقومی متأثر از ابعاد پنجره محاسبه است. با افزایش ابعاد پنجره، اثر جابه‌جایی نقاطی که دور از مرکز پنجره‌اند در محاسبه میزان جابه‌جایی پیکسل مرکزی افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه قدر پنجره کوچک‌تر باشد، نتایج حاصل از این روش مطمئن‌تر خواهد بود. البته باید این نکته را هم در نظر داشت که اگر پنجره خیلی کوچک باشد، حجم اطلاعات کم خواهد بود و از این‌رو خطای محاسبه افزایش چشمگیری خواهد داشت (Min Wang et al., 2009).

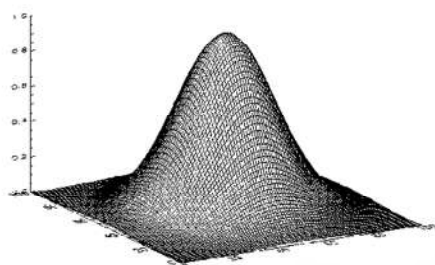
که یخچال علم‌چال، در این بازه زمانی، جابه‌جایی مسطحاتی معتدله‌ی نداشته و فقط در پیشانی یخچال عقب‌نشینی صورت گرفته است. شایان ذکر است که این مقایسه فقط در پیشانی یخچال انجام شده است و به‌علت اختلاف زمانی زیاد دو تصویر، نمی‌توان تغییرات سطحی پدیدآمده روی یخچال را اندازه‌گیری کرد زیرا سطح یخچال مدام تغییر می‌کند.

با مقایسه مرز رقومی‌شده در این دو سال، مشخص شد که پیشانی یخچال در بیشتر قسمت‌ها عقب‌نشینی دارد و بیشترین مقدار عقب‌نشینی یخچال در این بازه، بیست متر تخمین زده شد. البته این اندازه‌گیری فقط تغییرات پیشانی یخچال را در این بازه نشان می‌دهد و بدین معنا نیست که کل یخچال به این اندازه تغییر کرده است. ممکن است تغییرات و عقب‌نشینی یخچال بیشتر از این مقدار باشد زیرا تمامی رسوبات و مورون‌ها در پیشانی یخچال جمع می‌شوند و این امر در طول زمان ممکن است سبب جابه‌جایی مرز یخچال نشود ولی حجم ذخایر یخچالی کاهش می‌یابد (Aizen et al., 2007). با این حال، این مقدار عقب‌نشینی یخچال کاهش زیاد حجم ذخایر یخی آن را نیز نشان می‌دهد.



شکل ۳. سمت راست: تصویر SPOT 5 پیشانی یخچال مربوط به سال ۲۰۰۳؛ سمت چپ: عکس هوایی رقومی‌شده تصحیح و هم‌مختصات‌شده با تصویر SPOT 5، مربوط به سال ۱۹۵۵ و مرز رقومی‌شده یخچال، در دو سال، روی آن (خط سبز نشان‌دهنده مرز بالایی پیشانی یخچال در سال ۲۰۰۳ و نقطه چین قرمز نشان‌دهنده مرز بالایی پیشانی یخچال در سال ۱۹۵۵ است)

آن‌ها از پیکسل مرکزی، وزن اختصاص داده می‌شود. همچنین برای افزایش سرعت پردازش، از محاسبه همبستگی در حوزه فرکانس استفاده شده است. پس از دریافت تصاویر، پنجره‌ای گوسی مشابه تابع گوسی نشان داده شده در شکل ۴، که محاسبه آن طبق رابطه ۱ صورت می‌گیرد، ساخته می‌شود.



شکل ۴. تابع توزیع گوسی

رابطه (۱)

$$W(x, y) = e^{-((x-x_i)^2 + (y-y_j)^2) / \sigma^2}$$

در رابطه بالا،  $W(x,y)$  مقدار وزن،  $(i, j)$  شمارنده پیکسل و  $\sigma$  انحراف معیار تابع گوسی است که در این تحقیق برابر با ده پیکسل در نظر گرفته شده است. به‌ازای هر پیکسل در تصاویر، این پنجره گوسی روی تصویر قرار می‌گیرد و در آن ضرب می‌شود. بدین ترتیب پیکسل مرکزی دارای بیشترین وزن در محاسبه ضریب همبستگی خواهد بود زیرا میزان ماکسیمم پنجره گوسی روی پیکسل مرکزی قرار می‌گیرد و بالطبع، باقی پیکسل‌ها وزن کمتری خواهند داشت (Deriche, 1992). پس از وزن‌دهی پیکسل‌ها در دو تصویر به‌ازای پیکسل  $(i, j)$ ، به‌منظور کاهش حجم عملیات، ابعاد تصاویر کوچک می‌شوند. این کار با آستانه‌گذاری برای استخراج آن نواحی از تصویر که اطلاعات مفیدی دارند انجام می‌شود و بدین ترتیب، تصاویر نهایی دارای نمونه‌های تصویری کمتری‌اند. نکته مهم در الگوریتم این است که تعداد پیکسل‌ها باید توانی از ۲ باشند تا برای تبدیل فوریه گسسته مناسب باشند (Hale, 2007).

با توجه به کاربرد و نتایج مطلوب روش همبستگی تصاویر در اندازه‌گیری تغییرات سطحی در یخچال‌های طبیعی، محققان گوناگون از این روش بهره برده‌اند (Heid, 2011; Dehecq et al., 2015; Dirk Scherler et al., 2008). در روش همبستگی، پنجره‌ای روی تصویر مرجع تعریف می‌شود و با حرکت روی تصویر و مقایسه آن با تصویر هدف، همبستگی به‌دست می‌آید. در روش معمولی، وزن همه پیکسل‌های دور یا نزدیک به مرکز پنجره به‌صورت یکسان در محاسبه دخالت داده می‌شود که در واقعیت به این صورت نیست. به‌منظور کاهش اثر نقاط دور از مرکز پنجره در محاسبه ضریب همبستگی، می‌توان از تعریف تابع گوسی استفاده کرد (Debella-Gilo & Käab, 2011; Nobach & Honkanen, 2005).

محاسبه ضریب همبستگی بین تصاویر در حوزه مکان، با توجه به ابعاد تصویر و پنجره تعریف‌شده، معمولاً فرایندی زمان‌بر است (van Vliet et al., 1998). یکی از روش‌هایی که می‌توان با آن سرعت محاسبه ضریب همبستگی را افزایش داد انجام‌دادن محاسبات در حوزه فرکانس است (Haug et al., 2010; Debella-Gilo & Käab, 2011; Leprince et al., 2007). در حوزه فرکانس، با توجه به ویژگی تقارن ضرایب زوج و فرد تبدیل فوریه گسسته، محاسبه همبستگی با سرعت بیشتری انجام می‌شود (Kannappan & Sahoo, 1995). در این تحقیق نیز، ضریب همبستگی با انجام‌دادن محاسبات در حوزه فرکانس به‌دست آمده است. برای حذف خطای ناشی از تفاوت رادیومتریکی بین تصاویر، از یک مرحله همسان‌سازی رادیومتریکی نیز استفاده شده است. همچنین به‌منظور محاسبه میزان جابه‌جایی در یخچال طبیعی علم‌چال، برای کاهش اثر جابه‌جایی نقاط دور از مرکز پنجره در محاسبه ضریب همبستگی و بالطبع، جابه‌جایی پیکسل مرکزی، تابع گوسی به‌کار رفته است. بدین ترتیب که از این تابع برای وزن‌دهی تصاویر، جهت استخراج قسمت‌های مهم سیگنال تصویر، استفاده می‌شود؛ ضمن اینکه به پیکسل‌های قرارگرفته در داخل پنجره همبستگی، متناسب با فاصله



بیشینه همبستگی با دقت ۱ پیکسل خواهد آمد (Dirk Scherler et al., 2008). اکنون برای یافتن محل بیشینه همبستگی با دقت زیر پیکسل، کافی است از عملیات درون‌یابی<sup>۱</sup> استفاده شود (Kääb, 2002). برای این منظور، در محل بیشینه همبستگی پنجره‌ای ۱۰×۱۰ قرار داده می‌شود و با درون‌یابی، این محل که معادل با میزان جابه‌جایی پیکسل مرکزی در دو تکه تصویر است، با دقت ۰.۱ پیکسل پیدا می‌شود. با تقسیم مقدار این جابه‌جایی‌ها بر فاصله زمانی بین دو تصویربرداری، سرعت به دست می‌آید (Kääb, 2005). پس از محاسبه میزان جابه‌جایی در پیکسل ( $i, j$ ) با معرفی بازه زمانی بین دو تصویر، میزان سرعت محاسبه شد.

### ۳- نتایج

نتایج به دست آمده در زمینه اندازه‌گیری تغییرات کوتاه‌مدت به دو بخش تغییرات اندازه‌گیری شده بین دو تصویر ارتو و SPOT 5 و بین دو تصویر SPOT 5 و Quick Bird تقسیم‌بندی می‌شود. پس از محاسبه میزان جابه‌جایی باید نتایج حاصل، از نظر دقت و خطاهای رخ داده روی نتایج، بررسی و تحلیل شوند.

در شکل ۵، مقادیر جابه‌جایی محاسبه شده بین دو تصویر ارتو و SPOT 5 و تصاویر SPOT 5 و Quick Bird نشان داده شده است. به منظور ارزیابی تغییرات یخچال، آن گونه که مستقل از عامل زمان باشد، بهتر است از بررسی بردار سرعت حرکت یخچال استفاده کنیم (Avouac et al., 2006). بدین منظور، جابه‌جایی محاسبه شده بر فاصله زمانی بین دریافت تصاویر مورد استفاده در محاسبه جابه‌جایی تقسیم شد. فاصله زمانی بین تصاویر SPOT 5 و تصویر ارتو حاصل از عکس‌های هوایی پنج سال و فاصله زمانی بین تصویر SPOT 5 و QB دو سال است. در شکل ۶ میدان بردار سرعت محاسبه شده یخچال علم‌چال، منتج از تصاویر گوناگون، نشان داده شده است.

اگر هر یک از پنجره‌های مربوط به هر تصویر را با  $S_1$  و  $S_2$  نشان دهیم، مقادیر پیکسل‌های این پنجره‌ها از حاصل ضرب تصاویر  $I_1$  و  $I_2$  در تابع گوسی  $W$  و از رابطه (۲) به صورت زیر به دست خواهد آمد (Fisher & Welsch, 2008):

$$\begin{aligned} S_1^{i,j}(x, y) &= I_1(x, y) * W \\ S_2^{i,j}(x, y) &= I_2(x, y) * W \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲)}$$

همبستگی متقابل بین  $S_1$  و  $S_2$  را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کرد (Ibid.):

$$\begin{aligned} C^{i,j}(\delta x, \delta y) &= \iint dx dy S_1^{i,j}*(-x, -y) \\ & S_2^{i,j}(\delta x - x, \delta y - y) \end{aligned}$$

در رابطه بالا،  $\delta x$  و  $\delta y$  مقدار جابه‌جایی و  $C(\delta x, \delta y)$  بیانگر همبستگی محاسبه شده در محدوده این جابه‌جایی است. در این رابطه، مقدار  $\delta x$  و  $\delta y$  طوری محاسبه می‌شود که همبستگی برای هر دو تصویر  $S_1$  و  $S_2$  را، که در مختصات  $i, j$  روی هم قرار داده شده‌اند، دارای بیشترین مقدار باشد.

پس از کاهش ابعاد تصاویر، هر دو تصویر از طریق تبدیل فوریه به حوزه فرکانس برده می‌شوند و بعد از یافتن طیف تابع همبستگی در حوزه فرکانس، فقط لازم است از تبدیل معکوس فوریه استفاده شود تا همبستگی در حوزه مکان به دست آید. با استفاده از رابطه (۴)، همبستگی بین دو تصویر محاسبه می‌شود (Ibid.).

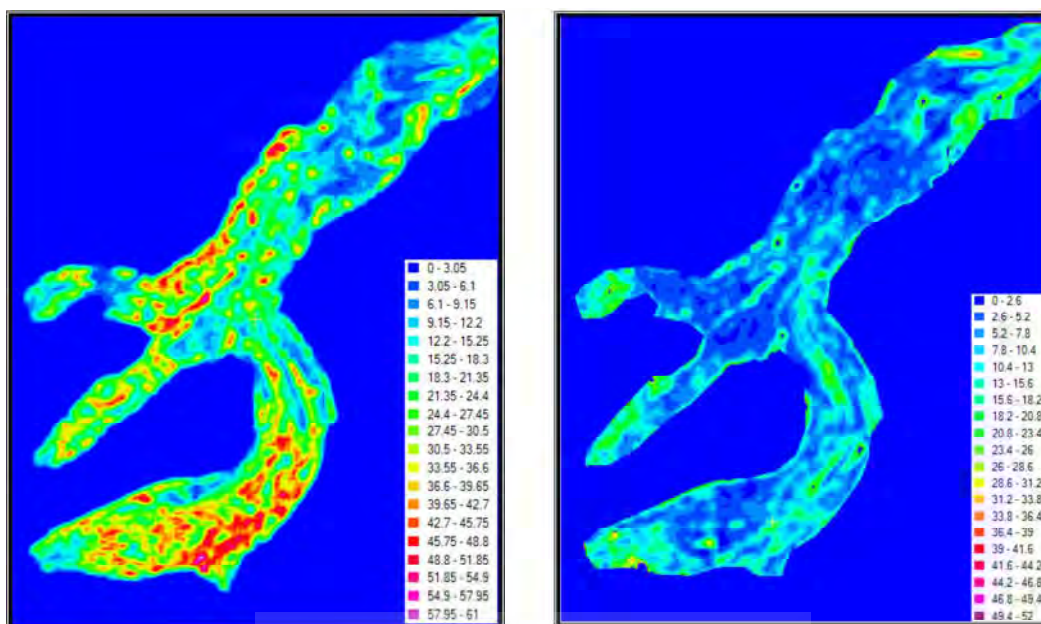
$$C^{i,j}(\delta x, \delta y) = F^{-1}(S_1(u, v) * S_2(u, v))$$

در این رابطه،  $S_1(u, v)$  تبدیل فوریه تصویر اول،  $S_2(u, v)$  تبدیل فوریه تصویر دوم،  $C$  نشان‌دهنده همبستگی متقابل، \* نشان‌دهنده مزدوج مختلط و  $F^{-1}$  نیز بیانگر تابع معکوس فوریه است.

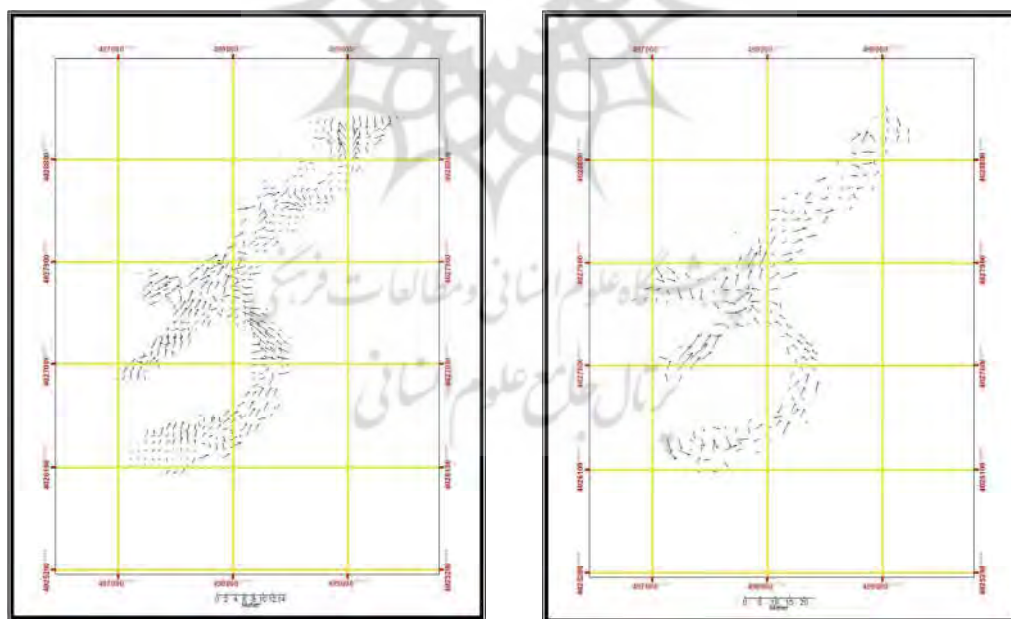
خروجی این مرحله مقادیر مختلط دارد، پس فقط باید مقدار حقیقی همبستگی جدا شود و بدین ترتیب، محل

1. interpolation

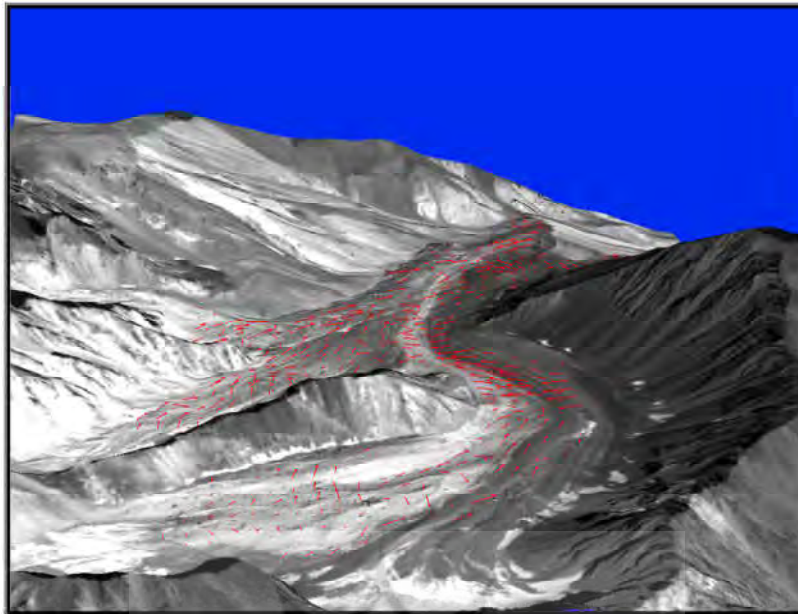
اندازه‌گیری تغییرات سطحی و سرعت حرکت یخچال علم‌چال ...



شکل ۵. تصاویر جابه‌جایی محاسبه‌شده سمت راست، بین دو تصویر SPOT 5 و Quick Bird، و سمت چپ، بین دو تصویر ارتو و SPOT



شکل ۶. سمت راست: میدان بردارهای سرعت سطحی یخچال علم‌چال، منتج از تصاویر ارتو و SPOT 5؛ سمت چپ: میدان بردارهای سرعت سطحی یخچال علم‌چال، منتج از تصاویر SPOT 5 و Quick Bird



شکل ۷. مدل سه بعدی منطقه به همراه تصویر SPOT 5 و بردارهای سرعت محاسبه شده بین دو تصویر SPOT 5 و Quick Bird

بدین منظور در مناطقی که جابه‌جایی در طول زمان ندارند، چندین نقطه (یا یک منطقه همگن) انتخاب و میزان جابه‌جایی محاسبه شده با الگوریتم را میانگین‌گیری کردیم، آن را خطای سیستماتیک در نظر گرفتیم و بر نتایج اعمال کردیم.

برای کشف و حذف جابه‌جایی‌های ناصحیح و خطاهای اتفاقی از روی نتایج به دست آمده، از روش فیلتر کردن استفاده شد. فیلتر کردن نتایج شامل فیلتر کردن مقدار و جهت است (Ibid.). به منظور فیلتر کردن مقادیر، نخست با استفاده از تست آماری ۳۵، جابه‌جایی‌های ناصحیح و نامرتب حذف شد و سپس برای حذف نتایج ناهمسان با پیکسل‌های همسایه، فیلتر میانگین به کار رفت. با استفاده از این دو روش، خطاهای اتفاقی و جابه‌جایی‌های ناصحیح از نتایج به دست آمده کنار گذاشته شد. برای فیلتر کردن جهت، با توجه به این مطلب که تغییرات ناگهانی در جهت بردارها رخ نمی‌دهد (Haerberli et al., 2000)، بردارهای با تغییرات ناگهانی در جهت حذف شدند. جابه‌جایی‌های محاسبه شده در زمینه اندازه‌گیری

در شکل ۷، نمایش سه بعدی از یخچال و بردار سرعت محاسبه شده روی آن نمایش داده شده است.

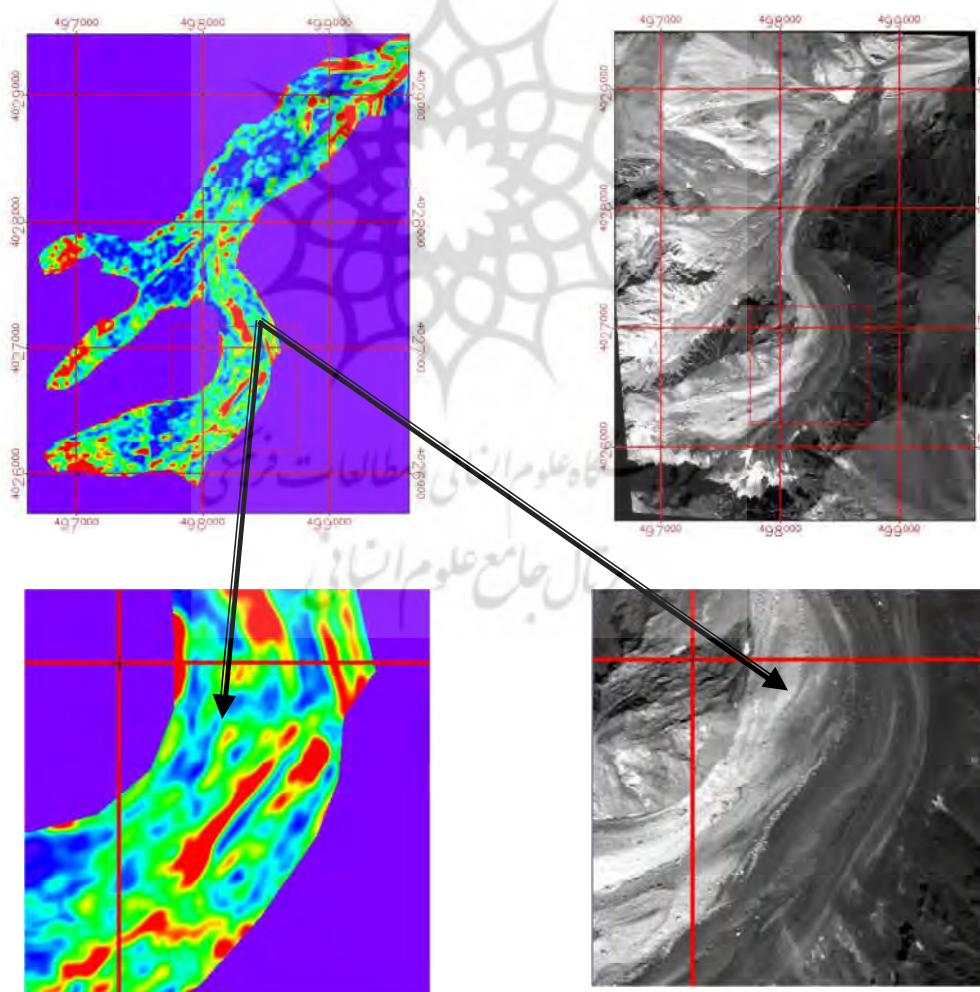
#### ۴- تحلیل و ارزیابی نتایج

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های قدیم و جدید نشان می‌دهد که یخچال علم‌چال در بازه زمانی ۴۸ ساله، به میزان بیست متر عقب‌نشینی داشته است و این مقدار فقط با بررسی حد بالای پیشانی یخچال، با استفاده از تصاویری که با دقت زیر یک پیکسل هم‌مختصات شده بودند، به دست آمده است. میزان تغییرات سطحی یخچال، اگر به همراه تغییرات ارتفاعی مطالعه شوند، عامل مناسبی برای تخمین میزان کاهش یا افزایش حجم ذخایر یخچال است که در این تحقیق، با توجه به نبود داده‌های ارتفاعی، این امر ممکن نشد.

خطاهای موجود روی نتایج، شامل جابه‌جایی‌های ناصحیح، خطاهای سیستماتیک و اتفاقی است. برای کشف و حذف خطاهای سیستماتیک، از مجموعه‌ای نقاط که با زمان ثابت‌اند، یعنی در دو تصویر باید ثابت باشند، استفاده شد (Dirk Scherler et al., 2008).

یخچال یکسان نیست. در ادامه، در مورد تغییرات محلی در سطح یخچال و علت آنها بحث خواهیم کرد. از نظر جابه‌جایی‌های محلی، همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، روی تصویر جابه‌جایی‌های منظمی مشاهده می‌شود که مقادیر آنها از پیکسل‌های همسایه بیشتر است. به‌منظور تفسیر این نتایج، به تصاویر ماهواره‌ای مراجعه شد و در این نقاط مجموعه‌ای عوارض مشخص یخچالی مشاهده کردیم که بیشتر نزدیک‌به‌هم و پیوسته‌اند. برای نمونه، یک جابه‌جایی خطی دیده می‌شود که مربوط به رشته‌های یخرفتی است و به حرکت این عوارض در جهتی خاص اشاره دارد که هم‌جهت با حرکت کلی یخچال است.

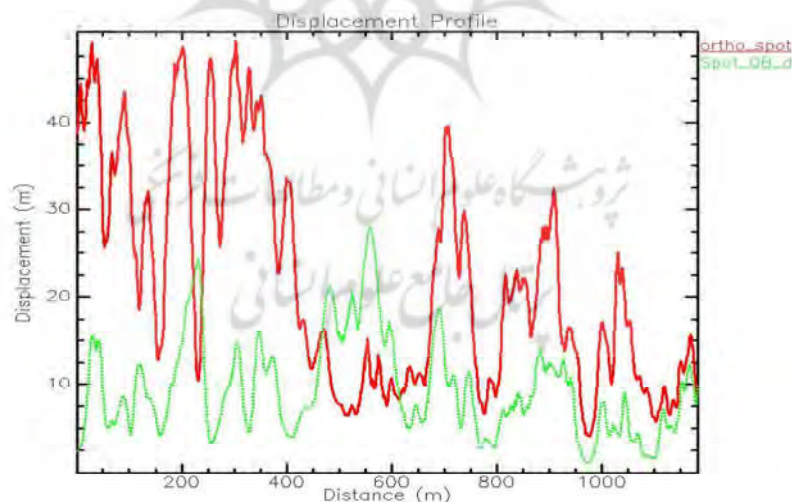
تغییرات کوتاه‌مدت به دو صورت بررسی می‌شوند: الف) از دیدگاه جابه‌جایی‌های کلی که روند تغییر کل یخچال را نشان می‌دهد؛ ب) جابه‌جایی‌های محلی که نشان‌دهنده تغییرات محلی در سطح یخچال است. جابه‌جایی کلی یا فلوی یخچال نشان‌دهنده سرازیر شدن یخچال به سمت ارتفاعات پایین‌تر است. این امر گویای زنده و در حال فعالیت بودن یخچال علم‌چال است. یخچال علم‌چال از سه شاخه خود به سمت پایین در حال حرکت است و سه بردار در یک نقطه تلاقی دارند که تصاویر جابه‌جایی محاسبه‌شده نیز این نکته را تأیید می‌کند. اگرچه روند کلی تغییرات یخچال به سمت پایین است، این تغییرات در همه سطح



شکل ۸. نمونه جابه‌جایی‌های محلی منظم یک رشته یخرفتی در سطح یخچال

با توجه به شکل و جهت بردارهای جابه‌جایی، می‌توان نتیجه گرفت مقدار این تغییرات در تمامی سطح یخچال یکسان نیست و تابعی از موقعیت نقطه روی سطح یخچال، فاصله آن از مرکز جرم یخچال و یا فاصله آن از منطقه خط تعادل یخچال است. در نقاطی که نزدیک به مرکز جرم است، بیشترین تغییرات دیده می‌شود. در نقاطی که در منطقه فرساب قرار گرفته‌اند، جابه‌جایی اندک و گاه به صورت عقب‌نشینی است و در نقاطی که در منطقه تجمع<sup>۱</sup> قرار دارند، جابه‌جایی به سمت پایین یخچال و اطراف دیده می‌شود. به منظور ارزیابی وضعیت میزان تغییرات سطح یخچال، تغییرات پدیدآمده در یک پروفیل طولی از یخچال بررسی شد. در شکل ۹، میزان تغییرات یخچال در پروفیلی طولی از آن، در بازه‌های زمانی متفاوت، نشان داده شده است.

با استفاده از این نتایج، می‌توان محل‌هایی را مشخص کرد که یخچال دارای بیشترین تغییرات است. این محل‌ها عبارت‌اند از محل تلاقی سه زبانه یخچالی که بردارهای جابه‌جایی دیده‌شده در این منطقه، از نظر جهت، متفاوت‌اند. در این قسمت، بردارها از سه زبانه یخچالی به پایین آمده‌اند و در این منطقه برخورد دارند. همچنین در محل‌هایی که یخچال زنده است و تحرک بیشتری دارد، جابه‌جایی‌های دیده‌شده بیشتر است. برای نمونه، در زبانه یخچالی مربوط به علم‌کوه، در این بخش بیشترین جرم یخچال موجود است و بیشترین حرکت زیرسطحی در این منطقه رخ داده و آثار آن در سطح یخچال مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر جابه‌جایی محاسبه‌شده، مشخص می‌شود که از نقطه تلاقی سه زبانه یخچالی به سمت پایین، یخچال جابه‌جایی چندانی ندارد و در اصطلاح، از این قسمت به پایین، یخچال مرده محسوب می‌شود و ذخایر یخی در حال ذوب‌شدن است.



شکل ۹. میزان جابه‌جایی یخچال در پروفیلی طولی از آن، در بازه‌های زمانی (۲۰۰۳-۱۹۹۸) و (۲۰۰۵-۲۰۰۳). خط قرمز نشان‌دهنده جابه‌جایی حاصل از عکس‌های هوایی و تصویر SPOT 5، و خط سبز نشان‌دهنده جابه‌جایی حاصل از تصویر SPOT و Quick Bird است.

## 1. accumulation

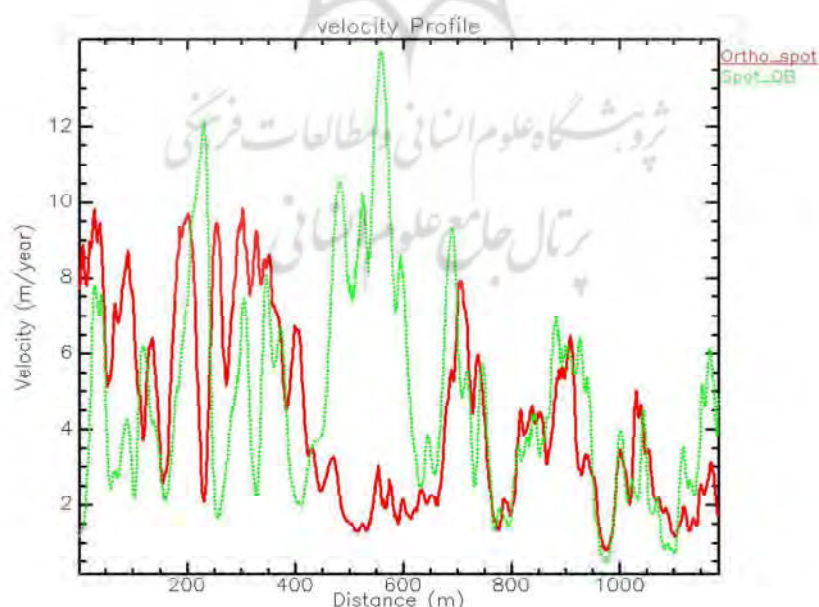
به‌منظور بررسی دقت نتایج، دوازده و یازده نقطه با عوارض مشخص، به‌ترتیب در دو تصویر Ortho و SPOT 5، و نیز در SPOT 5 و Quick Bird به‌منزله نقاط چک انتخاب شدند. جابه‌جایی آنها روی دو تصویر به‌صورت دستی محاسبه و نتایج آن با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم مقایسه شد. با بررسی نتایج این مقایسه، مقدار خطای حاصل ۱/۹۹ و ۲/۱۳ متر است که دقت مناسب روش به‌کاررفته را نشان می‌دهد. نقاط انتخابی معمولاً مورون‌های سطحی‌اند که بزرگ‌اند و به‌آسانی روی دو تصویر شناسایی می‌شوند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

استفاده از محاسبه تابع همبستگی بین عکس‌های هوایی یا تصاویر ماهواره‌ای دریافت‌شده از عارضه، در دو بازه زمانی، برای اندازه‌گیری تغییرات به‌کار می‌رود. از عوارض طبیعی که تغییرات آنها نشان‌دهنده تغییرات آب‌وهوایی است یخچال‌های طبیعی‌اند. تغییرات رخ داده در یخچال طبیعی را می‌توان به دو صورت، تغییرات پدیدآمده در بازه طولانی و تغییرات رخ داده در بازه کوتاه، بررسی کرد.

با توجه به شکل پروفیل طولی، مشاهده می‌شود روند کلی جابه‌جایی‌های حاصل از زوج تصاویر (Ortho- SPOT 5 و Quick Bird- SPOT 5) همانند یکدیگر است. پروفیل ترسیم‌شده با استفاده از تصاویر Ortho و SPOT 5، با توجه به فاصله زمانی بیشتر این تصاویر، جابه‌جایی‌های بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه این دو مقطع، مشخص می‌شود یخچال در قسمت‌های پایینی تحرک چندانی ندارد و در اصطلاح، یخچال در آن قسمت‌ها مرده است.

برای ارزیابی صحیح‌تر از میزان تغییرات یخچال، این تغییرات باید مستقل از عامل زمان با همدیگر مقایسه شوند. بدین‌منظور، از تصویر سرعت محاسبه‌شده استفاده شد. در شکل ۱۰، سرعت سطحی یخچال در مقطعی طولی از آن نشان داده شده است. با مقایسه دو مقطع، مشاهده می‌شود که سرعت تغییرات یخچال در اغلب قسمت‌ها یکسان است و فقط در یک نقطه، نزدیک به مرکز جرم یخچال، سرعت تغییرات در تصاویر جدید بیشتر است.



شکل ۱۰. سرعت سطحی یخچال در پروفیلی طولی از آن، در بازه‌های زمانی (۲۰۰۳-۱۹۹۸) و (۲۰۰۵-۲۰۰۳). خط قرمز نشان‌دهنده مقدار سرعت حاصل از عکس‌های هوایی و تصویر SPOT 5، و خط سبز نشان‌دهنده مقدار سرعت حاصل از تصویر SPOT 5 و Quick Bird است.

- Tien Shan as Determined from Topographic and Remotely Sensed Data**, *Global and Planetary Change*, 56, PP. 328–340.
- Avouac, J.P., Ayoub, F., Leprince, S., Konca, O. & Helmberger, D.V., 2006, **The 2005, Mw 7.6 Kashmir Earthquake: Sub-Pixel Correlation of ASTER Images and Seismic Waveform Analysis**, *Earth and Planetary Science Letters*, 249, PP. 514–528.
- Barnes, P. & Tabor, D., 1969, **Plastic Flow and Pressure Melting in the Deformation of Ice**, University of Cambridge.
- Berthier, E., Raup, B. & Scambos, T., 2003, **New Velocity Map and Mass-Balance Estimate of Mertz Glacier, East Antarctica, Derived from Landsat Sequential Imagery**, *Journal of Glaciology*, 49 (167), 503–511.
- Berthier, E., Vadon, H., Baratoux, D., Arnaud, Y., Vincent, C., Feigl, K.L., Re'my, F. & Legre'sy, B., 2005, **Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery**, *Remote Sensing of Environment (ELSEVIER)*, 95, PP. 14–28.
- Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F.J. & Kumar, R., 2016, **UAVs Asremote Sensing Platform in Glaciology: Present Applications and Future Prospects**, *Remote Sensing of Environment*, 175, PP. 196–204.
- Bindschadler, R. & Scambos, T., 1991. **Satellite-Image-Derived Velocity Field of an Antarctic Ice Stream**, *Science*, 252 (5003.۲۴۶-۲۴۲):
- Copland, L., Pope, S., Bishop, M.P., Shroder, J.F., Clendon, P., Bush, A., Kamp, U., Seong, Y.B. & Owen, L.A., 2009, **Glacier Velocities across the Central Karakoram**, *Annals of Glaciology*, 50 (52), PP. 41–49.
- Debella-Gilo, M. & Kääh, A., 2011, **Sub-Pixel Precision Image Matching for Measuring Surface Displacements on Mass Movements Using Normalized Cross-Correlation**, *Remote Sensing of Environment*, 115 (1), PP. 130–142.
- Dehecq, A., Gourmelen, N. & Trouve, E., 2015, **Deriving Large-Scale Glacier Velocities from a Complete Satellite Archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya**, *Remote Sensing of Environment*, 162, PP. 55–66.
- هدف از این تحقیق آشکارسازی تغییرات سیمای یخچال طبیعی علم‌چال، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نوری و عکس‌های هوایی بوده است. با دسترسی به مجموعه داده‌های چندزمانه در این تحقیق، میدان جابه‌جایی و سرعت در بخش‌های متفاوت یخچال علم‌چال استخراج شد. با استفاده از الگوریتم پیکسل مبنای تعیین جابه‌جایی، میزان تغییرات سطحی یخچال و نیز جهت حرکت آن ارزیابی شد.
- در این تحقیق از داده‌هایی در سه بازه زمانی ۴۸، پنج و دو ساله استفاده شده و براساس آنها میزان تغییرات سطحی یخچال علم‌چال اندازه‌گیری شده است. بررسی حد بالایی پیشانی یخچال نشان می‌دهد که یخچال علم‌چال در بازه زمانی ۴۸ ساله، دارای عقب نشینی بوده و از حجم آن کاسته شده است. همچنین با اندازه‌گیری تغییرات سطحی یخچال در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، جابجایی کلی یا فلوی یخچال استخراج گردید و این جابجایی‌ها نشان‌دهنده سرازیر شدن یخچال به سمت ارتفاعات پایین‌تر می‌باشد، که بیانگر زنده و در حال فعالیت بودن یخچال علم‌چال در مناطق دارای ارتفاع بالاتر از محل تلاقی سه زبانه یخچالی است. علاوه بر این، بررسی شکل و جهت بردارهای جابجایی سطحی یخچال، نشان می‌دهد که مقدار تغییرات سطحی در تمام سطح یخچال یکسان نبوده و تابعی از موقعیت نقطه بر روی سطح یخچال، فاصله آن از مرکز جرم یخچال و یا فاصله آن از منطقه خط تعادل یخچال، می‌باشد.
- ۶- منابع**
- ولدان زوج، م.ج، رضایی، ی.، وزیری، ف.، مباشری، م.ر.، ۱۳۸۷، **بررسی یخچال طبیعی علم‌چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای**، نشریه علوم زمین، دوره ۱۸، زمستان، ش. ۷۰، صص. ۱۳-۲.
- یمانی، م.، ۱۳۸۸، **اندازه‌گیری حرکت سالیانه یخچال‌های علم‌کوه**، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش. ۶۷، صص. ۵۲-۳۱.
- Aizen, V.B., Kuzmichenok, V.A., Surazakov, A.B. & Aizen, E.M., 2007, **Glacier Changes in the**

- Deriche, R., 1992, **Recursively Implementing the Gaussian and its Derivatives**, Proceedings of the 2nd International Conference on Image Processing, Singapore.
- Dirk Scherler, Leprince, S. & Strecker, M.R., 2008, **Glacier-Surface Velocities in Alpine Terrain from Optical Satellite Imagery-Accuracy Improvement and Quality Assessment**, Remote Sensing of Environment (ELSEVIER), 112, PP. 3806–381.
- Dowdeswell, J.A. & Benham, T.J., 2003, **A Surge of Perseibreen, Svalbard, Examined Using Aerial Photography and ASTER High Resolution Satellite Imagery**, Polar Research, 22 (2), PP. 373–383.
- Fisher, G.H. & Welsch, B.T., 2008, **FLCT: A Fast, Efficient Method for Performing Local Correlation Tracking**, Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity.
- Haerberli, W., Cihlar, J. & Barry, R.G., 2000, **Glacier Monitoring within the Global Climate Observing System**, Annals of Glaciology, 31, PP. 241–246.
- Haerberli, W., Hoelzle, M., Paul, F. & Zemp, M., 2007, **Integrated Monitoring of Mountain Glaciers as Key Indicators of Global Climate Change: The European Alps**, Annals of Glaciology, 46, PP. 150–160.
- Hale, D., 2007, **A Method for Estimating Apparent Displacementvectors from Time-Lapse Seismic Images**, Colorado School of Mines.
- Haug, T., Käab, A. & Skvarca, P., 2010, **Monitoring Ice Shelf Velocities from Repeat MODIS and Landsat Data: A Method Study on the Larsen C Ice Shelf, Antarctic Peninsula, and 10 other Iceshelves around Antarctica**, The Cryosphere, 4 (2), PP. 161–178.
- Heid, T., 2011, **Deriving Glacier Surface Velocities from Repeat Optical Images**, University of Oslo.
- Käab, A., 2002, **Monitoring High-Mountain Terrain Deformation from Repeated Air- and Spaceborne Optical Data: Examples Using Digital Aerial Imagery and ASTER Data**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57, PP. 39–52.
- Käab, A., 2005, **Combination of SRTM3 and Repeat ASTER Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya**, Remote Sensing of Environment (ELSEVIER), 94, PP. 463–474.
- Kannappan, P. & Sahoo, P.K., 1995, **Rotation Invariant Separable Functions Are GAUSSIAN**, SIAM Journal on Mathematical Analysis, 23, PP. 1342–1351.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. & Avouac, J.-P., 2007, **Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 45 (6), PP. 1529–1558.
- McClellan, J.H., Schafer, R.W. & Yoder, M.A., 2003, **Signal Processing First**, Pearson Education, Inc., Pearson Prentice Hall.
- Wang, M., Cen, Y., Hu, X., Yu, X., Xie, N., Wu, Y., Xu, P. & Xu, D., 2009, **A Weighting Window Applied to the Digital Image Correlation Method**, Optics & Laser Technology, ELSEVIER 41 (2), PP. 154–158.
- Moussavi, M., Valadan Zouj, M.J., Vaziri, F., Sahebi, M. & Rezaei, Y., 2010, **A New Glacier Inventory of Iran**, Annals of Glaciology, 50 (53), PP. 93–103.
- Nobach, H. & Honkanen, M., 2005, **Two-Dimensional Gaussian Regression for Sub-Pixel Displacement Estimation in Particle Image Velocimetry or Particle Position Estimation in Particle Tracking Velocimetry**, Experiments in Fluids, 38 (4), PP. 511–515.
- Skvarca, P., Raup, B. & De Angelis, H., 2003, **Recent Behaviour of Glacier Upsala, a Fast-Flowing Calving Glacier in Lago Argentino, Southern Patagonia**, Annals of Glaciology, 36 (1), 184–188.
- van Vliet, L., Young, I. & Verbeek, P., 1998, **Recursive Gaussian Derivative Filters**, Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, Brisbane.
- Yong, D., Teillet, P.M. & Cihlar, J., 2002, **Radiometric Normalization of Multitemporal High-Resolution Satellite Images with Quality Control for Land Cover Change Detection**, Remote Sensing of Environment (ELSEVIER), 82, PP. 123–134.