



Use of UAVs and Lidar to identify the Spatiotemporal elevation changes of AlamKooch Glacier

Sara Sheshangosht¹, Hossein Aghamohammadi^{*2}, Neamat Karimi³, Zahra Azizi⁴, Moahammad Hassan Vahidnia⁵

Date of receive:

2023/09/07

Date of last review:

2023/12/05

Date of accept:

2024/01/13

Date of online publication:

2024/02/21

Extended Abstract

Introduction

Glaciers and their short-term and long-term elevation changes are among the most critical environmental hazard indices for monitoring climate change and evaluating geomorphology, perpetually posing risks to climbers, environmentalists, and tourists. The Alamkooch glacier's snout is known as one of the most dynamic parts of glaciers in Takht-e-Soliman height due to the yearly advance and retreat of glacier movement causing substantial volumes of various glacial deposits to collapse into their downstream areas. Nowadays, the advancements of satellite imagery, aerial photos, and Unmanned Automated vehicles (UAV) pave the path for accurately extracting and evaluating these changes. Therefore, the objectives of this research are: (a) evaluating the use of new and cost-effective technologies (UAVs) in comparison to satellite imagery for monitoring glacier changes, (b) identifying spatiotemporal glacier elevation changes, and (c) evaluation of the elevation change rate of the Alamkooch glacier snout from 2010 to 2020 using high spatial resolution remotely sensing data. In this context, the elevation changes of the snout of Alamkooch Glacier, as the hazardous activist part of this glacier, were assessed using Digital elevation models (DEMs) differences of 2010, 2018, and 2020.

Materials & Methods

Alamkooch Glacier is located on the northern hillside of Alamkooch Summit in the Takht-e-Soliman region. The snout of this glacier is situated in a steep valley known as Lizbonak and its high activity changes the shape and morphology of this area. In this paper, spatial and temporal elevation changes of Alamkooch Snout were identified and evaluated using DEMs subtraction derived from aerial laser scanning (LiDAR) data in 2010, and from images captured by UAV in 2018 and 2020. Before elevation change analysis, the DEMs obtained through UAVs in 2018 and 2020 were carried out using approximately 40 and 20 ground control points, respectively. ... ▶ Page 80

Keywords:

Glacier,
Alamkooch,
Glacier snout,
Remote sensing,
UAV,
Elevation changes

1- Ph.D student, Department of remote sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Sara_shesh@yahoo.com

2- (*Corresponding author) Assistant professor, Department of remote sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Hossein.aghamohammadi@gmail.com

3- Associate professor, Research Center for Water Resource Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran, Nehmatkarimi@gmail.com

4- Assistant professor, Department of remote sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, zazizi@srbiau.ac.ir

5- Assistant professor Department of remote sensing and GIS, Faculty of earth science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, mh_vahidnia@sbu.ac.ir

The resulting outputs displayed a reliable accuracy of around 15 cm for these DEMs. In addition, for assessing elevation changes precisely, the all of extracted DEMs were preprocessed and orthorectified and then subsequently subtracted pairwise. Then after, the accuracy of elevation changes was appraised based on non-glacial area elevation change. The outcomes of elevation change in this region signify a high level of accuracy in the 10-year time span. According to the results, the average and standard division elevation change of non-glacial area was ± 0.05 cm and 0.34 cm respectively. Moreover, the average error assessment on the non-glacial area indicates that within eight years from 2010 to 2018 the average error was ± 0.16 cm, and within two years it was ± 0.11 cm from 2018 to 2020.

Result and discussion

Results of DEMs pairwise differences show significant elevation changes in this part of Alamkooh Glacier from 2010 to 2020. The average and the maximum elevation change rates in this period are -0.8 (m/yr.) and -2.31(m/yr.) respectively. The major elevation changes in the snout of Alamkooh happened in the initial period from 2010 to 2018 where the yearly and the maximum mean elevation change rates were -1.03 (m/yr.) and -2.77 (m/yr.) respectively. On the contrary, the elevation changes from 2018 to 2020 were lower than the first period whereas the yearly mean elevation change was about +0.1 (m/yr.) and the maximum elevation change rate was -1.85 (m/yr.). The positive rate of elevation change from 2018 to 2020 is due to debris and ice cubes flowing from upstream and accumulation downstream. Moreover, the Spatial analysis of elevation changes results show a heterogeneous distribution whereas the most significant elevation change in the snout of Alamkooh glacier has occurred predominantly across and along the largest existing valley rather than being evenly spread out across the entire area. The elevation change domain in this valley is between $+1.3 \pm 0.05$ to -23.05 ± 0.05 and the average elevation change of in ten years from 2010 to 2020 is about -8.01 ± 0.05 meters. These changes mostly were negative with decreasing and eroding rates. In contrast,

the elevation changes in other valleys only occurred at the exit area of the glacier and just the entrance of the snout area, and the margins did not show a considerable change. When considering all valleys in the snout of Alamkooh the elevation changes distribution across the snout varies between +0.45 to -13.2 (m) with an average of -7.8 (m) which is less than alongside changes at the main valley.

Conclusion

The results show elevation changes in the Almakoooh snout do not have constant rate and largely fluctuate in different years and regions. The maximum elevation changes occurred from 2010 to 2018 and along with the main steepest valley. The main valley plays a vital role in elevation change analysis and flowing debris down. This area is also known as the depletion area of the Alamkooh glacier and its drastic elevation changes are caused due to ice and snow melt. The tremendous historical flood of the SardAbrood River occurred in June 2011 was created and affected by elevation changes in this area. Therefore, the tongue of Alamkooh Glacier is considered one of the most dangerous areas regarding natural hazards, and morphological change studies require precaution regarding approaching or visiting this area. This research also confirms that using time-series of remote sensing data such as UAV and Lidar images is very helpful and cost-effective data for identifying, extracting, and monitoring the spatiotemporal changes of glaciers, debris flow directions, and natural hazards.



آشکار سازی مکانی - زمانی تغییرات ارتفاعی یخچال های طبیعی علم کوه با استفاده از داده های لیزراسکنینگ هوایی (LiDAR) و عکسبرداری با پهپاد (UAV)

سارا شش انگشت^۱، حسین آقامحمدی^۲، نعمت اله کریمی^۳، زهرا عزیزی^۴، محمدحسن وحیدنیا^۵

تاریخ دریافت:	۱۴۰۲/۰۶/۱۶
تاریخ آخرین بازنگری:	۱۴۰۲/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۲/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار:	۱۴۰۲/۱۲/۰۲
واژه های کلیدی:	یخچال طبیعی؛ علم کوه؛ دماغه یخچالی؛ سنجش از دور؛ پهپاد؛ تغییرات ارتفاعی
چکیده	یخچال های طبیعی و تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت آن ها، از مهم ترین سنسورهای اقلیمی برای پایش روند تغییرات آب و هوایی هستند. در تحقیق حاضر به منظور آشکار سازی مکانی - زمانی تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال؛ مدل های رقومی ارتفاعی حاصل، داده های لیزراسکنینگ هوایی (LiDAR) سال ۱۳۸۹ و تصاویر پهپاد سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹ مورد استفاده قرار گرفتند. دقت مدل های رقومی ارتفاعی (DEM) استخراج شده از پهپاد، در سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹ به ترتیب با استفاده از حدود ۴۰ و ۲۰ نقطه کنترل زمینی تقریباً ۱۵ سانتی متر برآورد شد. همچنین دقت برآورد تغییرات ارتفاعی براساس ارزیابی تغییرات ارتفاعی در منطقه غیر یخچالی در این بازه زمانی نشان دهنده دقت بالای نتایج است. به طوری که مقادیر میانگین و انحراف معیار در منطقه غیر یخچالی به ترتیب برابر با $0.05 \pm$ و 0.34 سانتی متر است که مقادیری قابل قبول در مطالعه تغییرات ارتفاعی یخچال به شمار می روند. نتایج حاصل از تفریق دو به دوی DEM های یاد شده نشان دهنده تغییرات ارتفاعی بسیار زیاد دماغه یخچال علم کوه از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ است. چنانچه میانگین نرخ تغییرات ارتفاعی شکاف اصلی دماغه یخچال در این مدت حدود 0.8 - متر در سال ($m/yr.$) و بیشترین مقدار نرخ تغییر ارتفاعی حدود -2.31 ($m/yr.$) است. عمده تغییرات ارتفاعی این منطقه در بازه زمانی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ به وجود آمده و میانگین نرخ تغییرات ارتفاعی شکاف اصلی یخچال در این مدت -1.03 ($m/yr.$) و حداکثر آن -2.77 ($m/yr.$) است. تغییرات ارتفاعی در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ کمتر بوده و میانگین نرخ تغییرات ارتفاعی $+0.1$ ($m/yr.$) و حداکثر آن -1.85 ($m/yr.$) است. با توجه به اینکه این منطقه به عنوان خروجی و محل تخلیه یخچال نیز شناخته شده و حجم زیادی از واریزه ها و یخرفت های یخچالی را به ارتفاعات پایین تر سرازیر می کند، تغییرات ارتفاعی شدید این منطقه ناشی از ذوب برف و یخ است و همین امر، عامل اصلی وقوع سیلاب عظیم تیرماه سال ۱۳۹۰ در رودخانه سردآبرود بوده است.

۱- دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و GIS، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران Sara_shesh@yahoo.com
۲- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) Hossein.aghahammadi@gmail.com
۳- دانشیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران Nehmatkarimi@gmail.com
۴- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران zazizi@sbiau.ac.ir
۵- استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران mh_vahidnia@shu.ac.ir

۱- مقدمه

آورد، اما این گونه تغییرات سطحی نمی‌توانند به نحو بارز و جامعی بیان‌کننده شدت تغییرات یخچال‌های طبیعی باشند. این موضوع در خصوص یخچال‌های طبیعی موجود در کشورهای خشک و نیمه‌خشکی همانند ایران از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا بخش قابل توجهی از سطح اینگونه یخچال‌ها توسط واریزه‌های یخچالی پوشیده شده است و تنها بخش ناچیزی از آن‌ها به صورت یخ مستقیم قابل مشاهده است (Karimi et al. 2012).

در واقع می‌توان عنوان کرد که مطالعه میزان تغییرات ارتفاعی یخچال‌های طبیعی، اصلی‌ترین فاکتور در مطالعه تغییرات و آشکارسازی مخاطرات مرتبط با آن‌ها محسوب می‌شود (Huang et al, 2018). در مطالعه تغییرات ارتفاعی و مورفولوژیکی یخچال‌ها، مدل‌های رقومی ارتفاعی ((DEM (Digital Elevation Model) مهم‌ترین و اساسی‌ترین داده است. زیرا با استفاده از اختلاف ارتفاع ثبت شده به توسط این DEM‌ها، می‌توان تغییرات ارتفاعی و ضخامت یخچال‌ها را اندازه‌گیری کرد. روش‌های گوناگونی برای استخراج مدل‌های رقومی ارتفاعی سطح یخچال‌ها (و تعیین توپوگرافی سطح آن‌ها) وجود دارد که از آن میان می‌توان به عکسبرداری زمینی، عکسبرداری هوایی، دوربین‌های رقومی، داده‌های راداری هوایی، داده‌های راداری فضایی، تصاویر ماهواره‌ای استریویی و لیزراسکنینگ هوایی اشاره کرد (Karimi et al. 2012). از جمله دقیق‌ترین روش‌های استخراج داده‌های ارتفاعی و توپوگرافی استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری است (Toutin, et al, 2000). چنانچه داده‌های SRTM برای به تصویر کشیدن توپوگرافی سطوح قاره‌ای بین ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۰ درجه شمالی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rabus, et al 2003). در کنار تصاویر راداری، از سنجنده‌های اپتیکی مختلفی همانند PRISM-ALOS.SPOT5-HRG و ASTER نیز می‌توان برای تهیه نقشه DEM استفاده کرد. با استفاده از این سنجنده‌ها DEM‌ها از زوج تصویرهای مختلف عرضی و طولی که از دو زاویه مختلف اخذ شده‌اند

در سالیان اخیر یخچال‌های طبیعی با روند کاهشی محسوسی مواجه شده‌اند (Khromova و همکاران، 2006). به‌عنوان مثال، در هیمالیا مطالعات فراوان انجام شده حکایت از کاهش قابل توجه سطح و حجم یخچال‌ها در ۲۵ سال اخیر دارند و این یخچال‌ها در حال حاضر به‌طور قابل ملاحظه‌ای به سرعت در حال ذوب شدن هستند (Fujita et al, 2014, Ren, et al 2006). اما تمامی یخچال‌های طبیعی جهان به‌طور هم‌زمان رفتارهای مشابهی را از خود نشان نمی‌دهند، بلکه اختلافات محلی و قابل توجهی بین یخچال‌های مختلف وجود دارد و حتی در پاره‌ای از موارد برخی از یخچال‌ها همانند یخچال‌های رشته‌کوه‌های Karakoram و یخچال‌های غربی Pamir و Kun Lun روند افزایشی نیز داشتند (Farinotti, et al 2021). از جمله موضوعات مرتبط با یخچال‌های طبیعی، مخاطرات گوناگون این‌گونه مناطق کوهستانی است. در واقع با توجه به اینکه یخچال‌ها به اشکال مختلفی به سمت ارتفاعات پایین‌تر جریان می‌یابند و به‌دلیل تغییرات نوسانات اقلیمی همواره در حال تغییر هستند، این تغییرات گاهی سبب جابه‌جایی ناگهانی بخش‌های عظیمی از یخچال می‌شود و همین مسئله موجبات خطرات فراوانی در این مناطق را به‌وجود می‌آورد. اینگونه مخاطرات معمولاً در مناطقی انتهایی یخچال که به‌عنوان دماغه یخچال (Glacier Snout) شناخته می‌شوند بسیار بیشتر از سایر بخش‌های یخچال است و همین امر منجر به معرفی دماغه‌های یخچالی به‌عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین بخش‌های یخچال‌های طبیعی شده است. زیرا همواره هرگونه پس‌روی و یا پیش‌روی یخچال از این منطقه آغاز می‌شود و این امر منجر به تغییرات شدید سالانه و حتی روزانه در این مناطق می‌شود.

اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی یخچال‌های طبیعی یکی از بهترین راه‌حل‌های ارزیابی میزان تغییرات مناطق یخچالی است (Kääb, 2002, Karimi et al. 2012). در واقع اگرچه نحوه عکس‌العمل یخچال‌ها در مقابل تغییرات اقلیمی را می‌توان از پایش مستمر تغییرات سطحی آن‌ها به‌دست

از این روش مکرراً برای بارسازی تغییرات ژئومورفولوژیکی و ارتفاعی سطوح مختلف زمینی شامل لایه‌های منجمد دائمی اعماق زمین Kääb (Permafrost) and Vollmer, 2000 و Wangensteen et al, 2006) خزش و جابه‌جایی تپه (Brown et al, 2007)، زمین لغزش (Betts et al, 2003)، حرکت توده‌های سنگی (Hapke, 2005)، تغییر شکل‌های آتشفشانی (Baldi et al, 2002) و تغییرات یخچال‌ها (Cox and March, 2004, Willis et al, 2011) استفاده شده است. با عنایت به موارد یاد شده، و قابلیت بالای پهپادها و عکس‌های هوایی در پایش دقیق تغییرات پدیده‌های طبیعی و تغییرات فیزیکی یخچال‌های طبیعی، نقشه توزیع مکانی - زمانی تغییرات و جابه‌جایی‌های ارتفاعی دماغه یخچال علم کوه برای اولین بار در کشور استخراج شد. نوآوری این تحقیق، (الف) افزایش دقت مکانی (در حد چند سانتی‌متر) نقشه توزیع مکانی تغییرات ارتفاعی و نرخ جابه‌جایی‌های ارتفاعی دماغه یخچال طبیعی علم کوه با استفاده از تصاویر اخذ شده از پهپاد و لیزر اسکینینگ هوایی، (ب) استفاده از تکنولوژی ارزان قیمت و در دسترس پهپاد، نقشه جابه‌جایی ارتفاعی یخچال در مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای تجاری با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا (VHR) با هزینه بسیار کمتر و (ج) شناسایی دقیق مناطق پرمخاطره یخچالی در کشور است. برآورد تغییرات ارتفاعی در این منطقه به دلیل ارزیابی خطرات ناشی از ذوب یخچال و ریزش واریزه‌های یخچالی در یکی از پرخطرترین مناطق گردشگری و توریستی کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا هدف اصلی تحقیق حاضر نیز، ارزیابی روند تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال این منطقه در دهه اخیر به‌عنوان یکی از دینامیک‌ترین و پرمخاطره‌ترین بخش‌های این یخچال با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی حاصله از LiDAR (اخذ شده در سال ۱۳۸۹) و عکس‌های هوایی اخذ شده از پهپاد (در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹) است. به‌این منظور پس از استخراج DEM‌های مناسب و ارزیابی میزان دقت آن‌ها، مقادیر ارتفاعی به‌دست آمده با فناوری‌های LiDAR و

به‌دست می‌آیند. اگرچه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مطالعه تغییرات مورفولوژیکی و ارتفاعی یخچال‌های طبیعی بسیار سودمند است، اما همواره استفاده از این تصاویر در مناطق یخچالی با چالش‌هایی مواجه است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل: الف) تغییرات زمانی مابین دو تصویر استریو اخذ شده، ب) پوشش‌های ابری در مناطق کوهستانی، ج) قدرت تفکیک مکانی پایین تصاویر ماهواره‌ای به‌خصوص در مطالعه یخچال‌های طبیعی کوچک، د) قدرت تفکیک زمانی پایین تصاویر ماهواره‌ای و عدم امکان اخذ تصاویر در بازه‌های زمانی دلخواه و ه) هزینه نسبتاً بالای تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا (Kraaijenbrink, et al, 2016) هستند. این چالش‌ها، محققان حوضه یخچال‌شناسی و سایر علوم زمینی را بر آن داشته است که از فناوری‌های نوینی همانند پهپادها برای پایش وضعیت یخچال‌های طبیعی استفاده کنند (جابری اقدم و همکاران، ۱۳۹۹). به‌طوری که با استفاده از پهپادها می‌توان تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا و در شرایط مناسب جوّی و با دوره‌های بازگشت زمانی دلخواه و منظم از سطح یخچال‌های طبیعی با قابلیت تهیه DEM برداشت کرد. این مزایا منجر به کاربرد روز افزون پهپادها در مطالعه یخچال‌های طبیعی شده است، به‌طوری که امروزه در مطالعات بسیاری از این فناوری برای پایش میزان جابه‌جایی، تغییرات سطحی و ارتفاعی و شناسایی شکاف‌ها، یخرفت‌ها و عوارض مرتبط با یخچال‌های طبیعی استفاده می‌شود (Whitehead et al, 2013, Clayton et al, 2016, Immerzeel et al, 2014, Kraaijenbrink et al, 2016, Rippin, et al, 2015)

پس از تهیه نقشه‌های توپوگرافی سطح یخچال‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، تغییرات ارتفاعی و حجمی آن‌ها را می‌توان با استفاده از کم کردن مقادیر ارتفاعی ثبت شده در زمان t_1 از زمان t_2 مطابق با رابطه ۱ به‌دست آورد (Karimi et al, 2012)

$$\Delta h = t_2 - t_1$$

رابطه (۱)

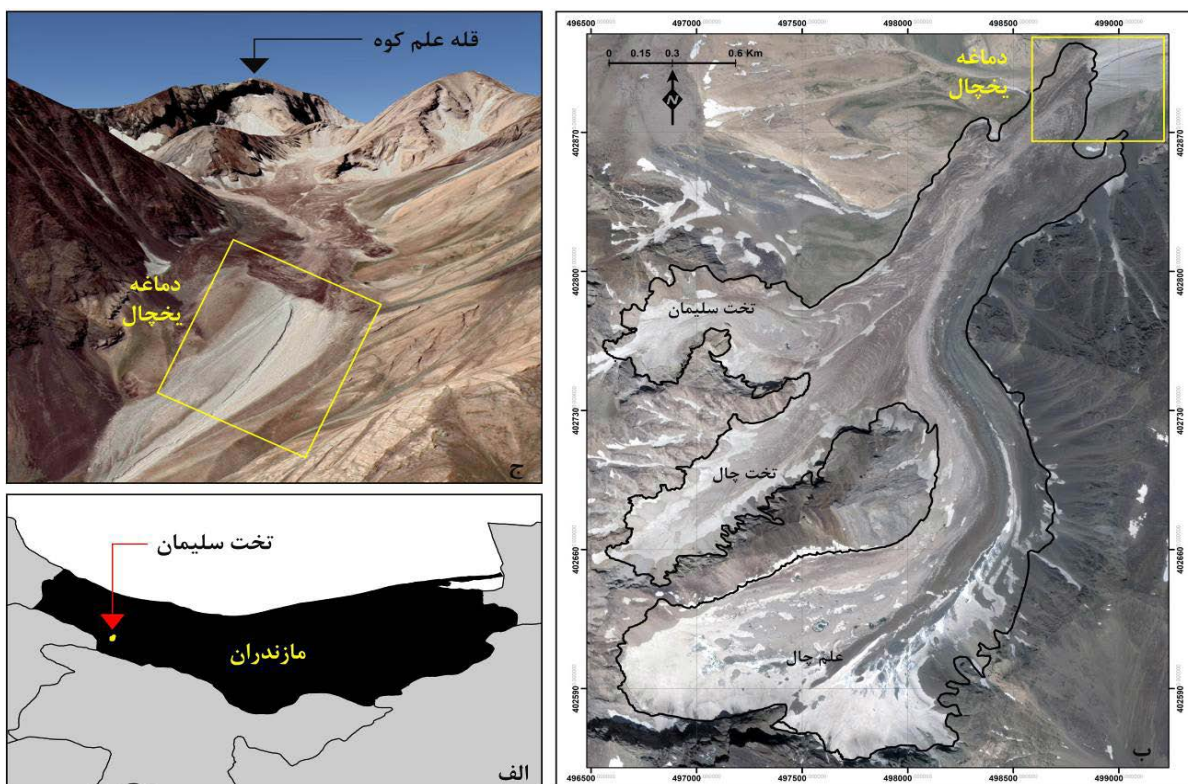
و تحول آن در دوران سوم پس از تشکیل هسته مرکزی البرز این رشته کوه‌ها با انحنايي جنوبي و رشته‌های متعدد ناهمواري شکل گرفته است (يماني، ۱۳۸۶). اين منطقه جزء سردترين مناطق ايران محسوب مي‌شود که دمای آن در زمستان به ۳۰- درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد (وزيری، ۱۳۸۲). منطقه تخت سلیمان که از آن می‌توان به‌عنوان بزرگ‌ترین و تپيک‌ترین منطقه یخچالی کشور یاد کرد در استان مازندران، بخش کلاردشت، و در حد فاصل دره طالقان و جنگل‌های عباس‌آباد و شهسوار واقع شده است (نگاره ۱-الف). منطقه تخت سلیمان از جمله مشهورترین ارتفاعات ایران و آشنا برای کوهنوردان خارجی است. در این منطقه یخچال‌های متعدد و بزرگی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را نسبت به قله علم‌کوه به سه دسته مجزا از یکدیگر تقسیم کرد: یخچال‌های شمالی، یخچال‌های غربی و یخچال‌های جنوبی که در تحقیق حاضر دماغه انتهایی یخچال‌های دامنه شمالی

پهپاد در فاصله سال‌های ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ مورد مقایسه قرار گرفت و تغییرات ارتفاعی دماغه یخچالی اندازه‌گیری شد. بر این اساس اهداف تحقیق حاضر شامل (الف) ارزیابی کارایی استفاده از تکنولوژی‌های نوین (پهپادها) برای پایش تغییرات یخچال‌های طبیعی کشور، (ب) آشکارسازی موقعیت مکانی تغییرات ارتفاعی و مورفولوژیکی دماغه یخچال علم‌کوه و (ج) تعیین نرخ تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

از جمله مهم‌ترین یادگارهای اقلیمی دوران چهارم زمین‌شناسی در ایران، یخچال‌های منطقه تخت سلیمان است (Farajzadeh, & Karimi, 2014). بررسی‌های زمین‌شناختی نشان می‌دهد که در اواخر دوران دوم زمین‌شناسی و تکمیل



نگاره ۱: منطقه مورد مطالعه. (الف) موقعیت یخچال‌های منطقه تخت سلیمان در استان مازندران، (ب) یخچال علم‌کوه و موقعیت دماغه انتهایی آن، (ج) تصویر سه‌بعدی دماغه یخچال علم‌کوه

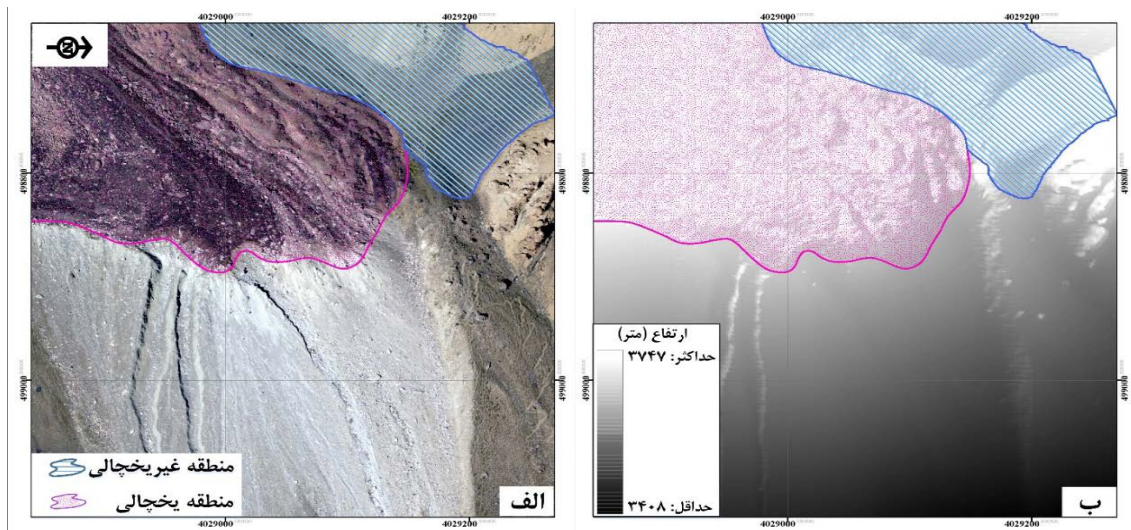
ارسال پالس‌های امواج الکترومغناطیسی به سطح زمین و محاسبه زمان رفت و برگشت آن‌ها است. توانایی برآورد ارتفاع سطح پوشش‌های برفی و یخی یکی از ویژگی‌های مهم داده‌های LiDAR در مقایسه با سایر تکنیک‌های سنجش از دوری است (Arnold et al, 2006, Demuth, 2011). در این تحقیق داده‌های لیزراسکنینگ هوایی که با استفاده از سنجنده Riegl LMS-Q560 در تابستان سال ۱۳۸۹ اخذ شده، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های مذکور با تراکم بالا برداشت شده‌اند، یعنی در هر متر مربع یک نقطه برداشت شده است. این امر امکان نمایش جزئیات سطح یخچال علم‌کوه را فراهم کرده است. در واقع داده‌های لیزراسکنینگ ابتدا منجر به تهیه ابر نقطه‌ای شد که در نهایت این نقاط با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی به نقشه رستری DEM تبدیل شد. لازم به ذکر است که قدرت تفکیک مکانی DEM مذکور در حدود یک متر است. در نگاره ۲ تصویر لیزراسکنینگ منطقه و نقشه DEM مستخرج از آن در دماغه یخچال علم‌کوه، نشان داده شده است.

همچنین به منظور تهیه مدل رقومی ارتفاعی دماغه یخچال در شهریور سال ۱۳۹۷ و مهرماه ۱۳۹۹، از پهپاد DJI Phantom 4 Pro استفاده شد. این پهپاد مجهز به یک دوربین ۲۰ مگاپیکسلی است. این پهپاد جزء یکی از ارزان‌ترین و کوچک‌ترین پهپادهای بال ثابت است که قابلیت به‌کارگیری بسیار مناسبی در مناطق یخچالی و کوهستانی در مقایسه با سایر پهپادها دارد. به همین دلیل از این پهپاد در بسیاری از مطالعات یخچالی استفاده شده است. به منظور عکسبرداری از یخچال، ارتفاع پرواز پهپاد حدود ۱۵۰ متر در نظر گرفته شد که امکان اخذ تصاویری با قدرت تفکیک ۵ سانتی‌متر فراهم شد. همچنین به دلیل شرایط توپوگرافی منطقه همپوشانی طولی و عرضی تصاویر اخذ شده برابر با ۸۰ درصد در نظر گرفته شد تا بتوان از همپوشانی مناسب تصاویر اخذ شده به منظور استخراج مدل رقومی ارتفاعی اطمینان حاصل کرد. پس از عکسبرداری هوایی، پردازش‌های لازمه در نرم‌افزار تجاری Pix4DMapper انجام گرفت و ضمن تهیه

(نگاره ۱-ب) به دلیل اهمیت و وسعت قابل توجه آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. این دماغه (نگاره ۱-ج) منتهی به دره‌ای با شیب بسیار زیادی است (این بخش در زبان محلی تحت عنوان لیزبنک شناخته می‌شود) و از مهم‌ترین ویژگی‌های آن فعالیت قابل توجه و دینامیک بودن آن است که منجر به تغییر شکل و مورفولوژی منطقه و تغییرات ارتفاعی زیاد منطقه شده است. به طوری که در هنگام بازدیدهای میدانی نیز همواره می‌توان ریزش‌های قابل توجهی از یخرفت‌ها و واریزه‌های یخچالی را مشاهده کرد. همان‌طور که در (نگاره ۱-ب) نیز نمایان است، سهم عظیمی از این یخچال از واریزه‌های ریز و درشتی پوشیده شده که به دلایل مختلفی همچون وقوع بهمن، هوازگی و ریزش صخره‌های اطراف و یا بارندگی‌های شدید ایجاد شده و از قله‌ها و دامنه‌های مشرف به آن نشأت گرفته است. براساس تجارب موجود در منطقه علم‌کوه، مؤثرترین عامل ایجاد واریزه‌ها وقوع هوازگی و ریزش‌های ناگهانی قله‌ها و صخره‌های اطراف است. طول این یخچال از زیر دیواره علم‌کوه تا زبانه انتهایی آن که به لیزبنک ختم می‌شود در حدود ۴/۵ کیلومتر و عرض سیرک آن نیز در حدود ۱/۵ کیلومتر است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده و نحوه تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی

در تحقیق حاضر از دو سری داده سنجش از دوری به منظور برآورد تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه استفاده شد. اولین سری از داده‌های مورد اشاره مربوط به داده‌های لیزراسکنینگ هوایی (LiDAR) است که در سال ۱۳۸۹ از این منطقه یخچالی اخذ شده است و دومین سری داده‌ها مربوط به تصاویر اخذ شده توسط پهپاد در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹ است. فناوری LiDAR از جمله روش‌های فعال سنجش از دور است که برای اندازه‌گیری مختصات سه‌بعدی نقاط زمینی و عوارض مختلف موجود در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه عملکرد تکنیک مزبور براساس



نگاره ۲: (الف) تصویر لیزر اسکینینگ دماغه یخچال و (ب) نقشه مدل ارتفاعی رقومی منطقه در سال ۱۳۸۹

شمیم استفاده شد. همچنین در انتخاب نقاط از عوارض و سنگ‌هایی استفاده شد که تشخیص و شناسایی آن‌ها در عکس‌های هوایی راحت باشد. به این منظور تمامی نقاط کنترلی پیش از تهیه عکس‌های هوایی علامت‌گذاری و شماره‌گذاری شدند. این امر امکان مطالعه و ارزیابی میزان جابه‌جایی یخچال‌ها در سال‌های آتی را نیز فراهم می‌کند. به طوری که در تصویربرداری سال ۱۳۹۹ نیز ۱۵ نقطه از نقاط کنترلی سال ۱۳۹۷ مورد استفاده قرار گرفت. در نگاره ۳ نمونه‌هایی از واریزه‌ها و نقاط علامت‌گذاری شده نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در سال ۱۳۹۷ برای پردازش عکس‌های هوایی و استخراج مدل ارتفاعی منطقه مورد مطالعه، از ۳۰ نقطه کنترل زمینی (معادل ۷۵ درصد از کل نقاط زمینی تهیه شده) استفاده شد و حدود ۱۰ نقطه نیز برای کنترل و ارزیابی خطای نقشه مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده، مقادیر خطاهای مسطحاتی نقشه DEM تولید شده در راستاهای X و Y به ترتیب در حدود ۶ و ۳ سانتی‌متر بوده است. همچنین خطای ارتفاعی نقشه تولید شده در ۱۰ نقطه کنترلی در مجموع در حدود ۹ سانتی‌متر است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت بسیار بالا و قابل قبول نقشه نهایی تولید شده است.

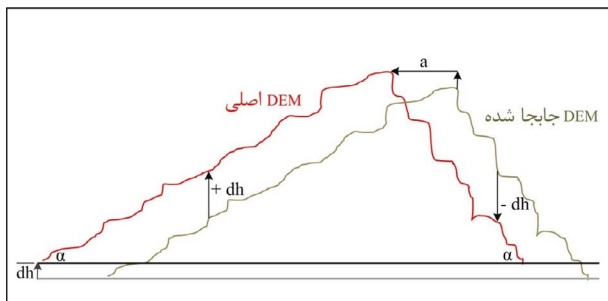
موزاییک عکس‌های هوایی منطقه، نقشه DEM نیز استخراج شد. در کنار عکسبرداری هوایی، تعدادی نقاط کنترل زمینی (GCP) با استفاده از GPS‌های دو فرکانسه با دقت بسیار بالا تعیین شد. زیرا به منظور تهیه نقشه مدل ارتفاعی (DEM) از تصاویر پهپادها لازم است، تصاویر هوایی که با یکدیگر همپوشانی دارند با استفاده از نقاط کنترل زمینی یاد شده نسبت به یکدیگر توجیه شوند. به این منظور پیش از عزیمت به منطقه ابتدا بر روی تصاویر ماهواره‌ای قدیمی از منطقه عوارضی که در تصاویر قابل مشاهده بودند شناسایی شدند. این عوارض هم بر روی سطح یخچال و هم بر روی مناطق حاشیه‌ای و غیر متحرک یخچال انتخاب شدند. در مجموع در سال ۱۳۹۷ حدود ۴۰ عارضه و در سال ۱۳۹۹ حدود ۲۰ عارضه با ابعاد و موقعیت‌های مختلف در سطح و مناطق اطراف دماغه یخچال شناسایی شد. نقاط کنترلی یاد شده با استفاده از GPS دو فرکانسه Trimble مدل R8 تهیه شد. در این عملیات ایستگاه ثابتی در نزدیکی پناهگاه سرچال قرار داده شد که به همگی بخش‌های یخچال و به خصوص دماغه آن دسترسی و آنتن‌دهی داشته باشد. نقاط نیز به صورت PPK برداشت شدند تا بتوان ضمن استفاده از ایستگاه ثابت GPS، از سامانه‌های آنلاینی که به این منظور تعبیه شده‌اند نیز استفاده نمود. در این تحقیق از سامانه



نگاره ۳: نمایی از نمونه‌های زمینی (GCP) برداشت شده و نحوه علامتگذاری آن‌ها در مناطق اطراف دماغه یخچال علم‌کوه

نحوه عملکرد تکنیک مزبور که تابعی از شیب زمین و جهت آن است در فلوجارت نگاره ۵ و همچنین نحوه بروز خطا در صورت وجود جابه‌جایی در داده‌های ارتفاعی در نگاره ۴ نمایش داده شده است. همانطور که در این تصاویر نیز نشان داده شده است، تغییرات ارتفاعی (dh) در مناطق با شیب زیاد بیشتر از مناطق مسطح است که دلیل این مسئله نیز برمی‌گردد به ارتباط بین اندازه میزان جابه‌جایی افقی (a) و تغییرات ارتفاعی با تانژانت شیب سطح زمین (α):

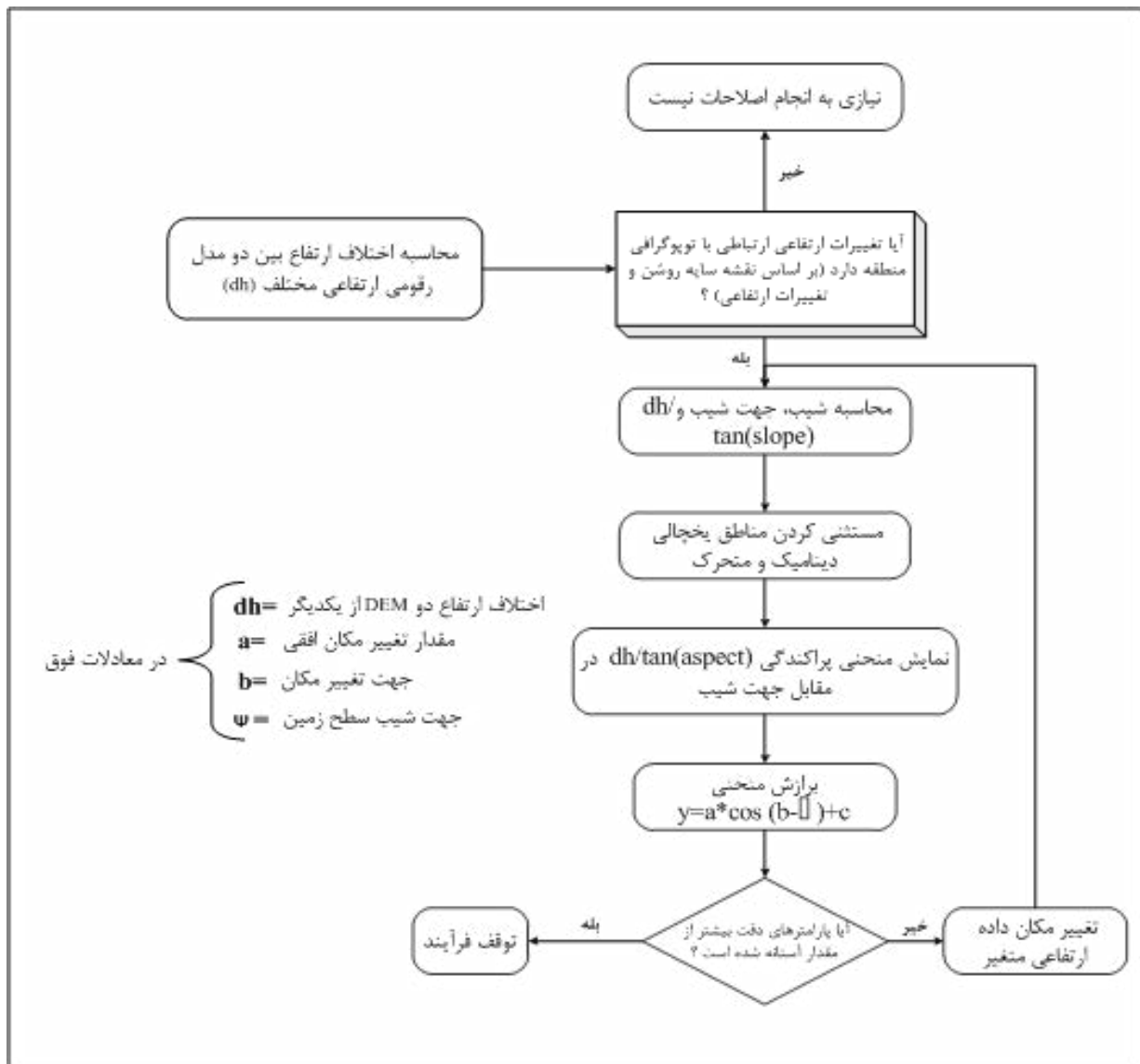
$$\tan(\alpha) = \frac{dh}{a} \quad \text{رابطه (۲)}$$



نگاره ۴: طرح ساده‌ای از خطاهای وارد شده ناشی از جابه‌جایی در مدل‌های رقومی ارتفاعی

۲-۳- ثبت مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی به یکدیگر و کاهش میزان خطاها

با عنایت به این واقعیت که داده‌های ارتفاعی تحت‌تأثیر خطاهای مختلفی هستند که بر اثر عواملی همانند اعوجاجات سنجنده، محدودیت تکنیک‌ها و سنسورهای استفاده شده و شرایط آب و هوایی نامناسب ایجاد می‌شوند، ضروری است که تحلیل‌های مختلفی برای حذف و یا به حداقل رساندن خطاهای مزبور انجام گیرد. در واقع تنها با حذف خطاهای سیستماتیک و غیرسیستماتیک DEM‌های استخراج شده است که می‌توان به دقت تغییرات ارتفاعی اندازه‌گیری شده یخچال‌ها اطمینان کرد. از جمله مهم‌ترین اصلاحاتی که باید در خصوص داده‌های ارتفاعی که از منابع مختلفی تهیه شده‌اند انجام شود ثبت مکانی (Co-Register) کردن آن‌ها به منظور ثبت تمام داده‌های ارتفاعی است تا هر کدام از پیکسل‌های آن نشان‌دهنده موقعیت یکسانی از سطح زمین باشند. در صورت عدم هم‌مرجع کردن داده‌ها بعد از استخراج DEM در بین داده‌ها جابه‌جایی‌هایی مشاهده می‌شود که با عدم مرتفع ساختن آن‌ها خطای زیادی در نتایج نهایی به وجود خواهد آمد. برای اصلاح خطای مذکور تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که از آن میان می‌توان به روش Nuth و Kaab اشاره کرد (Nuth, C.; & Kääb, 2011).



نگاره ۵: فلوچارت نحوه اصلاح جابه‌جایی مدل‌های رقومی ارتفاعی براساس مدل پیشنهادی Nuth و Kaab

هرگونه تغییرات ارتفاعی و یا جابه‌جایی افقی هستند) نشان داده شده است. همانطور که در این نگاره نمایان است پیش از اصلاح جابه‌جایی مذکور میانگین اختلاف بین دو مدل رقومی ارتفاعی به دست آمده در حدود ۱- متر بوده است اما پس از جابه‌جایی و ثبت دو نقشه رقومی ارتفاعی نسبت به یکدیگر این مقدار اختلاف به‌طور میانگین به حدود صفر بسیار نزدیک شده است. در واقع نتایج نشان داد که با توجه به متفاوت بودن منبع داده‌های مورد استفاده و همچنین شیب بسیار زیاد منطقه مورد مطالعه، جابه‌جایی نسبتاً قابل

بنابراین عدم اصلاح خطای حاضر منجر به مثبت بودن تغییرات ارتفاعی در دامنه‌های شرقی و منفی بودن آن در دامنه‌های غربی می‌شود. پس از برآورد پارامترهای لازم برای مدل حاضر (شامل پارامترهای a, b و c) برای هرکدام از DEMهای حاصل از پهپاد نسبت به داده LiDAR، بر حسب زاویه انتقال و میزان آن منتقل شد.

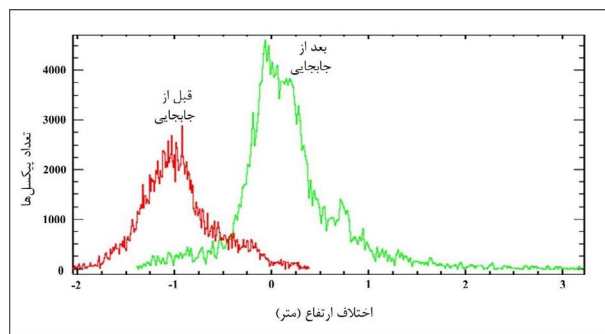
در نگاره ۶ هیستوگرام اختلاف DEM پهپاد با LiDAR در قبل و بعد از جابه‌جایی آن در مناطق ثابت اطراف یخچالی (مناطق که در اطراف یخچال هستند و فاقد

۳- نتایج و بحث

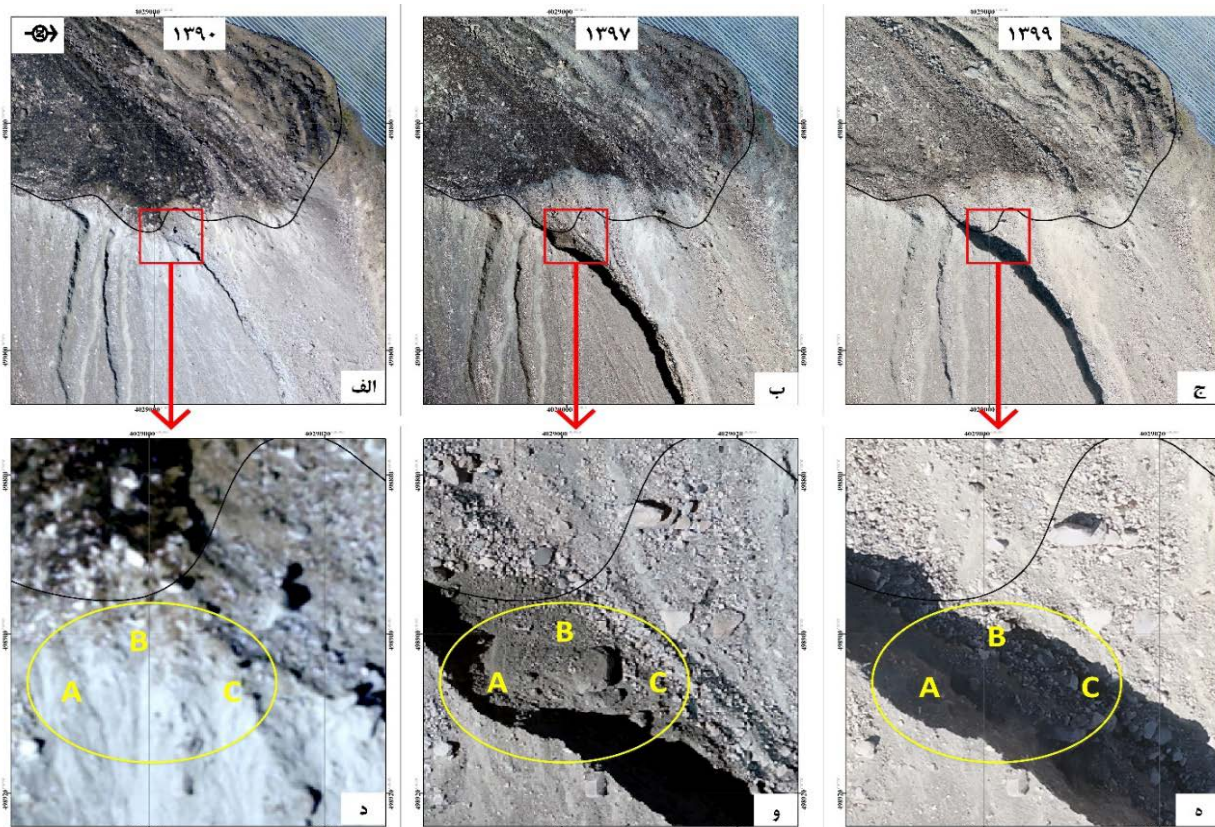
تصاویر لیزر اسکینینگ هوایی و پهپادی اخذ شده از منطقه علم‌کوه پس از پردازش‌های اولیه و هم‌مرج‌نمودن تصاویر نسبت به یکدیگر به منظور ارزیابی تغییرات مورد استفاده قرار گرفتند. تغییر شکل و تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه بر روی تصاویر نگاره ۷ به‌طور کامل نمایان است.

در نگاره ۷- (الف) تصویر لیزراسکینینگ سال ۱۳۸۹ و نگاره ۷- (ب) تصویر پهپاد ۱۳۹۷ و نگاره ۷- (ج) تصویر پهپاد ۱۳۹۹ را نشان می‌دهند. دماغه یخچال در سال ۱۳۸۹ (نگاره ۷- الف و د) سطح نسبتاً همواری داشته است و پس از سیلاب تاریخی ۱۳۹۰ فعالیت آن آغاز شده و تغییرات چشمگیری را شاهد بوده است. تغییرات منطقه ابتدایی

توجهی در مدل‌های رقومی ارتفاعی به‌وجود آمده است. این موضوع ضرورت ثبت داده‌های رقومی ارتفاعی قبل از هرگونه تحلیل نهایی را نشان می‌دهد.



نگاره ۶: هیستوگرام اختلاف ارتفاع DEM استخراج شده از پهپاد و LiDAR در قبل و بعد از اصلاح جابه‌جایی افقی در مناطق اطراف یخچال



نگاره ۷: تصویر دماغه یخچال علم‌کوه (الف) تصویر لیزراسکینینگ، (ب) تصویر پهپاد سال ۱۳۹۷،

(ج) تصویر پهپاد سال ۱۳۹۹ و بزرگنمایی منطقه تغییر یافته (د) تصویر لیزراسکینینگ،

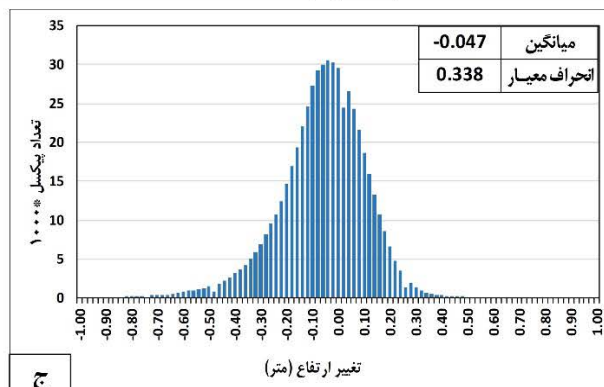
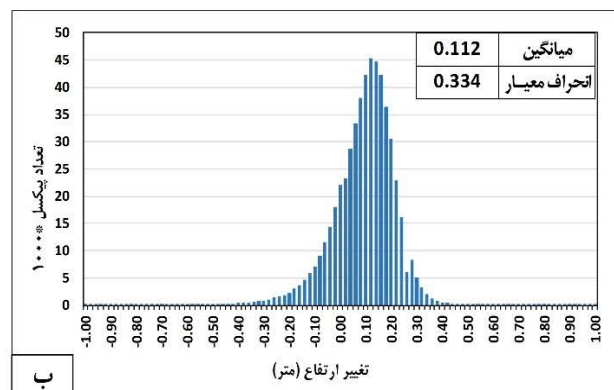
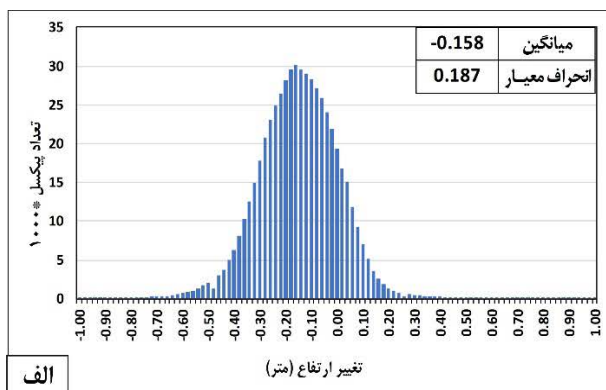
(و) تصویر پهپاد سال ۱۳۹۷، (ه) تصویر پهپاد سال ۱۳۹۹

۳-۱- ارزیابی و صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی دقت اختلاف ارتفاعی حاصل در دماغه یخچال لازم است تا دقت اختلاف ارتفاع به دست آمده صحت‌سنجی شود. به این منظور میزان تغییرات ارتفاعی هر یک از بازه‌های زمانی از ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۹ در منطقه غیر یخچالی پیرامون یخچال علم‌کوه به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی دقت اختلاف ارتفاعی در مناطق غیر یخچالی براساس مطالعات انجام شده یکی از روش‌های رایج ارزیابی دقت تغییرات ارتفاعی نقشه‌های DEM در مناطق یخچالی است (Immerzeel et al., 2014). در نگاره ۸ هیستوگرام تغییرات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

منطقه غیر یخچالی (شامل حدوداً ۵۴۰۰۰ پیکسل ۰/۵*۰/۵ مترمربعی است) در دامنه غربی یخچال واقع شده

دماغه بسیار محسوس است که در بزرگنمایی تصویری پهباد ۱۳۹۷ (نگاره ۷-و)) و تصویری پهباد ۱۳۹۹ (نگاره ۷-ه)) به وضوح دیده می‌شود. براساس تصویری سال ۱۳۹۷ در این منطقه شکاف بزرگی با عمق زیاد ایجاد شده (A) و سطح آن با ریزش و جابه‌جایی یخرفت‌ها و واریزه‌های یخچالی به سطحی ناهموار (B) تبدیل شده است (نگاره ۷-و)). بخش زیادی از شکاف این منطقه در سال ۱۳۹۹ با تجمع واریزه‌ها پر شده است و در بخش شمال‌غربی آن شکاف‌های ریز (C) دیگری نیز به وجود آمده است (نگاره ۷-ه)). در ادامه آنالیز و صحت‌سنجی روش استخراج نقشه‌های تغییرات ارتفاعی، توزیع مکانی و نرخ تغییرات ارتفاعی رخ داده در هر یک از بازه‌های زمانی از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ و کل بازه زمانی ده ساله به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.



نگاره ۸: هیستوگرام تغییرات ارتفاعی منطقه غیر یخچالی در بازه‌های زمانی (الف) از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۷،

(ب) از سال ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۹ و (ج) از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

آشکارسازی مکانی - زمانی تغییرات ارتفاعی یخچال‌های طبیعی علم‌کوه با استفاده از ... / ۹۱

۹-الف)، نرخ تغییرات سالانه بین ۲/۷۷- تا ۰/۲ متر در سال نوسان داشته و میانگین تغییرات سالانه آن حدوداً برابر با ۱/۰۳- متر در سال بوده است. در این بازه زمانی دماغه یخچال تغییرات ارتفاعی شدیدی داشته است، به طوری که در مناطق بالادست دماغه و منتهی علیه شرقی (منطقه بنفش رنگ) تغییرات ارتفاعی بین ۱۶/۰±۱۵- متر تا ۱۶/۱±۲۲- متر بوده است که موجب ایجاد شکاف بزرگی در دماغه یخچال شده است. با توجه به اینکه شیب این منطقه بسیار زیاد است تغییرات ارتفاعی یکسان نبوده و نوسانات زیادی دارد و مناطق حاشیه‌ای دماغه تغییرات ارتفاعی مثبت (بین صفر تا ۱/۱۶+ متر) به وجود آمده است. میانگین تغییرات ارتفاعی در بازه هشت ساله ۱۶/۱±۸/۲۲- متر است. تغییرات ارتفاعی در بازه دو ساله از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ (نگاره ۹-ب) نسبت به بازه اول کمتر بوده ولی نوسان زیادی داشته است. به طوری که با وجود افت تغییرات ارتفاعی در شکاف اصلی دماغه (تغییرات ارتفاعی کوچک‌تر از ۵- متر در دو سال) و در برخی مناطق سطح دماغه با تجمع سنگریزه‌ها و جابه‌جایی‌های واریزه‌ها تغییرات ارتفاعی مثبت به وجود آمده (تغییر ارتفاعی بیش از ۲+ متر در سال) اتفاق افتاده است. میانگین تغییرات ارتفاعی دماغه در بازه زمانی دو سال از ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ در حدود ۱۱/۰±۰/۲- متر و نرخ تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال ۱/۰+ متر در سال است. با این وجود برآیند تغییرات ارتفاعی ده ساله یخچال مطابق با نگاره ۹-ج، بیانگر تغییرات ارتفاعی شدید دماغه یخچال و نوسان ارتفاعی بین ۰/۰۵±۲۳/۰۵- متر تا ۰/۰۵±۱/۳+ متر در ده سال است. در بازه ده ساله میانگین تغییرات ارتفاعی این ۰/۰۵±۸/۰۱- متر است. این مسئله با توجه به شیب بسیار زیاد منطقه از جنبه بررسی تغییرات جغرافیایی و مورمولوژیکی منطقه حائز اهمیت است.

با توجه به اینکه این منطقه که به‌عنوان منطقه خروجی و تخلیه یخچال نیز شناخته می‌شود و همواره حجم زیادی از واریزه‌ها و یخ‌های یخچالی از آن به سمت پایین سرازیر می‌شود، منطقه‌ای است که سیلاب عظیم سال ۱۳۹۰ نیز

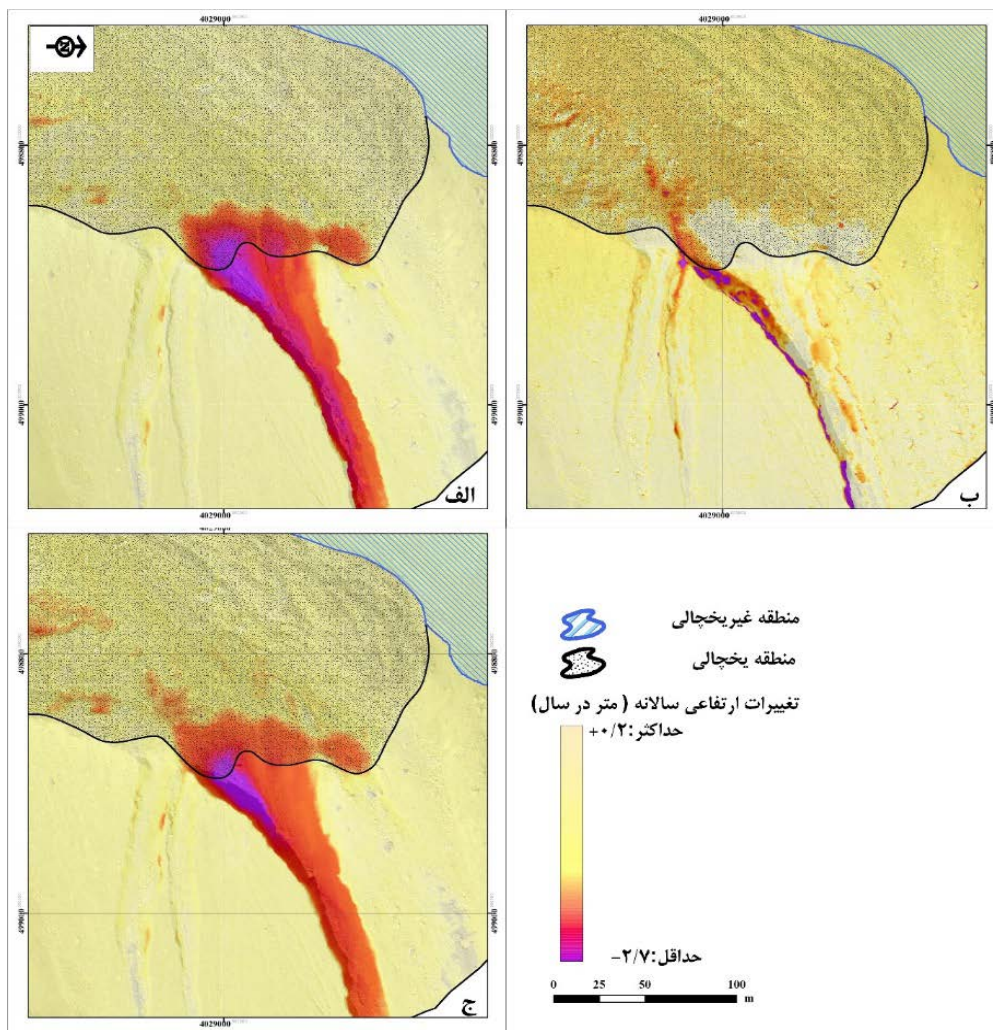
و فاقد هرگونه تغییرات ارتفاعی و یا جابه‌جایی سطحی است. لازم به ذکر است موقعیت منطقه غیر یخچالی قبلاً در نگاره ۲ نشان داده شده است.

براساس نگاره ۸، انحراف معیار در منطقه غیر یخچالی در بازه‌های زمانی مختلف به ترتیب (الف) از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ برابر با ۰/۱۸ متر، (ب) از ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ برابر با ۰/۳۳ متر و در کل بازه زمانی مورد مطالعه از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹ برابر با ۰/۳۴ بوده است و میانگین اختلاف ارتفاعی در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ برابر با ۰/۱۵-، در بازه ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ برابر با ۰/۱۱+ و در بازه زمانی ده ساله از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹ برابر با ۰/۰۴- بوده است. مقادیر انحراف معیار و میانگین تغییر ارتفاع در این هیستوگرام‌ها نشان‌دهنده خطای مجاز انحراف معیار در حدود ۰/۲۶ متر در مطالعه ارتفاعی مناطق یخچالی است (Immerzeel et al., 2014). با وجود اینکه انحراف معیار در بازه زمانی ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۹ کمی بیش از خطای مجاز است ولی این مقدار خطا در مقایسه با تغییرات ارتفاعی دماغه یخچالی علم‌کوه که در بازه زمانی ده ساله تغییرات ارتفاعی بسیاری زیادی (کاهش بیش از دو متر در سال) را تجربه کرده، بسیار ناچیز است.

۳-۲- تغییرات ارتفاعی در بازه‌های زمانی مختلف

پس از استخراج نقشه‌های رقومی ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه با استفاده از LiDAR و پهپاد، ثبت دوبه‌دوی نقشه‌ها نسبت به یکدیگر و رفع جابه‌جایی آن‌ها و همچنین پس از اطمینان از صحت و سقم داده‌های مورد استفاده با ارزیابی نقشه‌ها در منطقه غیر یخچالی، نقشه تغییرات ارتفاعی این منطقه در فاصله سال‌های ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ با کسر دوبه‌دوی نقشه‌های DEM از یکدیگر استخراج شد. تغییرات ارتفاعی سالانه دماغه یخچال در نگاره ۹-الف)، از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷، نگاره ۹-ب) از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹، نگاره ۹-ج) از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹ نشان داده شده است.

مطابق با نقشه‌های تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال در نگاره ۹، این منطقه در بازه زمانی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ (نگاره



نگاره ۹: نقشه تغییرات ارتفاعی سالانه یخچال دماغه علم کوه (الف) از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷، (ب) از ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ و (ج) از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹

می‌شود. با فرض ثابت در نظر گرفتن نرخ تغییرات ارتفاعی سالیانه، می‌توان عنوان کرد که به‌طور میانگین تغییرات ارتفاعی از $+0.2$ متر الی -2.7 متر در سال دماغه یخچال علم کوه فرونشست و یا فروریزش داشته که با توجه به شرایط یخچال علم کوه نرخ نسبتاً قابل ملاحظه‌ای است. نکته قابل توجه در خصوص تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال علم کوه، یکسان نبودن توزیع مکانی تغییرات ارتفاعی آن است. به‌طوری که بیشترین تغییرات افتاده در محدوده خروجی دره ماندی اتفاق افتاده است و سایر بخش‌های دماغه تغییرات اندک و نزدیک به صفری

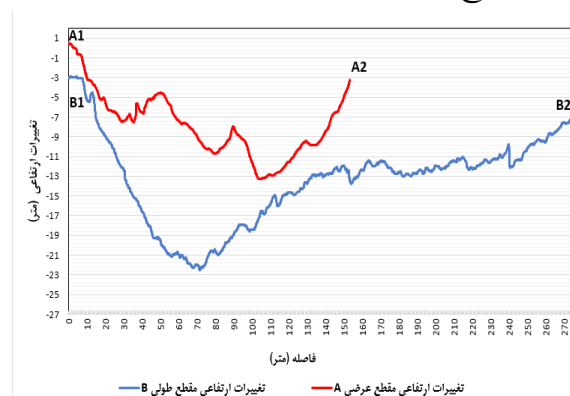
از آن نشأت گرفته است. در واقع خروج ناگهانی آب از منطقه منجر به سیلاب مذکور شده است، این منطقه پتانسیل ایجاد سیلاب‌های دیگر و خطرات ریزش واریزه‌ها را دارد و لذا بررسی تغییرات ارتفاعی و تغییرات مورفولوژیک منطقه اهمیت بالایی دارد. همانطور که در نگاره ۹ نیز نمایان است، این منطقه تغییرات شدید ارتفاعی تا حدود -23 متر را نیز در طول سالیان گذشته تجربه کرده است. تغییرات اتفاق افتاده در این بخش به حدی بوده که بخش انتهایی دماغه یخچال به شکل دره‌ای نسبتاً عمیق در آمده است که حتی در مطالعات میدانی نیز تغییرات آنی و شدید آن مشاهده

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

آشکارسازی مکانی - زمانی تغییرات ارتفاعی یخچال‌های طبیعی علم‌کوه با استفاده از ... / ۹۳

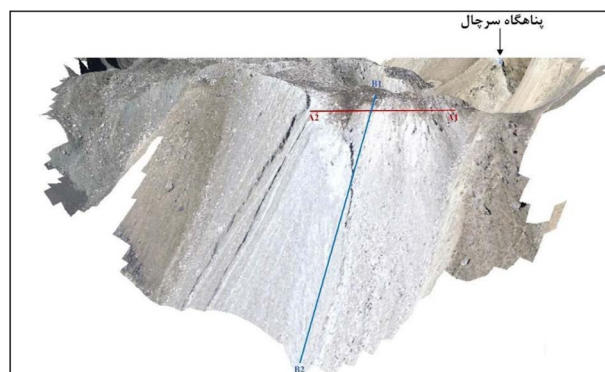
دماغه داشته است. تغییرات ارتفاعی شکاف اول ۷/۱- متر و تغییرات ارتفاعی شکاف دوم ۶- متر است. ولی شکاف سوم (از فاصله ۹۰ متری تا ۱۵۳ متری مقطع عرضی نشان داده شده در نگاره ۱۱) شکاف اصلی و عمیق‌تری است و ویژگی آن گسترش طولی و عرضی بسیار زیاد آن است. این شکاف نوسانات و تغییرات ارتفاعی نسبتاً چشمگیرتری (۱۰- متر) را تجربه نموده است. به‌طور کلی تغییرات ارتفاعی در مقطع A از غرب به شرق روندی افزایشی داشته است (از A1 به سمت A2).

تغییرات ارتفاعی مقطع طولی B در نگاره ۱۱ حکایت از افت قابل توجه و بسیار شدید ارتفاع در طول ۷۱ متر اولیه این مقطع دارد. به‌طوری که با فاصله گرفتن از ابتدای مقطع طولی (B1) تغییرات ارتفاعی از حدود ۳- متر به حدود ۲۲/۵- متر رسیده است که بسیار شدید بوده و احتمال ریزش ناگهانی یخرفت‌ها و سنگریزه‌ها را تشدید می‌کند. دلیل تغییر بسیار شدید این منطقه نیز در شیب بسیار زیاد آن نهفته است. به‌طوری که شیب منطقه گاهی تا حدود ۷۵ درجه نیز می‌رسد. اما بعد از فاصله ۷۱ متری، تغییرات ارتفاعی تقریباً ثابت بوده و در بازه ۲۲- الی ۷- متر نوسان نموده که نسبت به ابتدای این مقطع طولی از نوسانات کمتری برخوردار است و تغییرات ارتفاعی به سمت انتهای دماغه به تدریج کاسته شده است.



نگاره ۱۱: تغییرات ارتفاعی مقاطع طولی و عرضی دماغه یخچال علم‌کوه (موقعیت مکانی این مقاطع در نگاره ۱۰ نشان داده شده است)

را تجربه نموده است. اگرچه در کنار شکاف اصلی می‌توان شکاف‌های دیگری را نیز مشاهده کرد، اما این مناطق گسترش نسبتاً محدودی داشته و توسعه زیادی نداشته‌اند. این موضوع به معنی عدم همگن بودن خروجی یخچال در بخش‌های مختلف دماغه است. زیرا بیشتر خروجی و ذوب یخچال در این منطقه در بخش محدودی متمرکز شده و سایر بخش‌های دماغه تقریباً ثابت مانده است. لذا به‌منظور نمایش هرچه بهتر تغییرات دماغه یخچال علم‌کوه، تغییرات ارتفاعی این منطقه در دو مقطع عرضی و طولی (که به ترتیب با مقاطع A و B در نگاره ۱۰ نشان داده شده‌اند) مورد بررسی قرار گرفت.



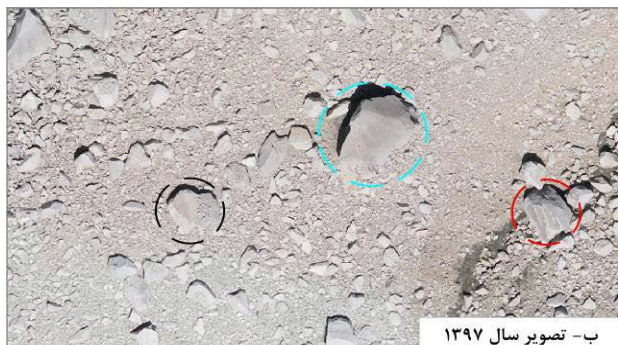
نگاره ۱۰: موقعیت مکانی مقاطع طولی و عرضی دماغه یخچال علم‌کوه

پروفیل‌های طولی و عرضی دماغه یخچال بر روی مقاطع A و B براساس تغییرات ارتفاعی کل بازه زمانی مورد مطالعه از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ در نگاره ۱۱ ترسیم شده است. تغییرات مقطع عرضی A به طول ۱۵۰ متر که کاملاً بر روی محل خروجی یخچال واقع شده، از مقدار $+۰/۴۵$ متر الی $-۱۳/۲$ متر تغییر ارتفاعی داشته و میانگین تغییرات آن در حدود $-۷/۸۲$ متر بوده است. همانطور که پیشتر نیز شرح داده شده، این منطقه شامل سه شکاف نسبتاً عمیق است که شکاف‌های اول و دوم (که از فاصله صفر الی ۹۰ متری مقطع عرضی A نشان داده شده است) گسترش مکانی زیادی به‌خصوص به سمت ارتفاعات پایین‌تر را نداشته و تغییرات ارتفاعی کمتری را نسبت به شکاف اصلی

افزایش یافته است. این امر به این دلیل رخ داده که یخچال مورد مطالعه، علاوه بر تغییرات ارتفاعی (کاهش یا افزایش) دارای یک سری تغییرات و جابه‌جایی‌های افقی نیز هست. به طوری که برآوردهای قبلی صورت گرفته در این منطقه حکایت از جابه‌جایی ۲ متری یخچال‌های این منطقه دارد (بمانی ۱۳۸۸). بدیهی است که اینگونه جابه‌جایی‌های یخچالی منجر به جابه‌جایی عوارض سطحی و به خصوص سنگ‌ها و واریزه‌های مستقر بر روی یخچال و دماغه آن می‌شود. لذا با توجه به فاصله زمانی نسبتاً زیادی که مابین عکسبرداری سال ۱۳۸۹ با سال ۱۳۹۹ وجود دارد، انتظار می‌رود که در بسیاری از مناطق یخچالی جابه‌جایی‌های افقی زیادی اتفاق افتاده باشد. در نگاره ۱۲ نمونه‌هایی از اینگونه جابه‌جایی‌های افقی نشان داده شده است. در نگاره ۱۲، سه عارضه نشان داده شده (با دایره‌های مشکی، آبی و قرمز رنگ) از ۱۸ الی ۲۵ متر در فاصله سال‌های ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۷ جابه‌جا شده‌اند. بدیهی

نکته قابل توجه در خصوص تغییرات ارتفاعی این مقطع طولی، کاهش تدریجی تغییرات ارتفاعی از فاصله ۱۵۳ متری به بعد است. زیرا از این نقطه به بعد تغییرات ارتفاعی از حدود ۱۳- متر به تدریج و به صورت آهسته به حدود ۷/۵- متر کاهش یافته است. دلیل اصلی این موضوع نیز تجمع واریزه‌های بخش‌های بالاتر در قسمت‌های پایین‌تر دماغه است. به طوری که از ابتدای دماغه که واریزه‌ها به سرعت در حال ریزش هستند بعد از مسافت حدود ۱۵۳ متری از سرعت آن‌ها کاسته شده و به تدریج در این منطقه رسوب می‌کنند و در نهایت منجر به کمتر بودن تغییرات ارتفاعی آن نسبت به بخش‌های مرتفع‌تر شده است.

اگرچه تغییرات اتفاق افتاده در سطح دماغه یخچال علم‌کوه عمدتاً کاهش و یا بدون تغییر بوده است، اما در برخی موارد می‌توان مناطقی را یافت که تغییرات آن‌ها نه تنها کاهش و یا ثابت نبوده، بلکه حتی ارتفاع آن‌ها نیز



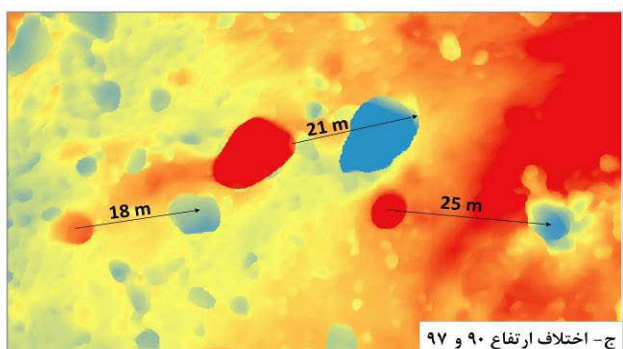
ب- تصویر سال ۱۳۹۷



الف- تصویر سال ۱۳۹۰



د- تصویر همپوشانی شده



ج- اختلاف ارتفاع ۹۰ و ۹۷

نگاره ۱۲: تغییرات و جابه‌جایی‌های افقی واریزه‌های یخچالی و اثرات آن بر تغییرات ارتفاعی. الف) تصویر هوایی ثبت شده در سال ۱۳۸۹ و موقعیت سه واریزه یخچالی بزرگ مستقر بر روی دماغه یخچال علم‌کوه، ب) تصویر پهپاد ثبت شده در سال ۱۳۹۷ و نحوه جابه‌جایی واریزه‌های یخچالی، ج) نحوه تغییرات ارتفاعی سه واریزه جابه‌جا شده و د) همپوشانی دو تصویر سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۷ و میزان جابه‌جایی واریزه‌های یخچالی

به منظور آشکارسازی تغییرات این منطقه از یخچال علم‌کوه از سه سری مدل رقومی ارتفاعی که در سال‌های ۱۳۸۹ با استفاده از LiDAR و در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹ با استفاده از پهپاد از منطقه اخذ شده، استفاده شد. به منظور به دست آوردن نتایج دقیق و قابل اعتماد، قبل از تفریق مدل‌های رقومی ارتفاعی از یکدیگر، ابتدا این مدل‌ها با استفاده از مدل‌های پیشنهاد شده توسط محققین دیگر به یکدیگر ثبت مکانی شد. این فرآیند، افزایش قابل توجه دقت اختلاف ارتفاع‌های محاسبه شده را موجب شد.

ارزیابی نتایج تفریق مدل‌های رقومی ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه در فاصله سال‌های ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه این منطقه است. به طوری که تغییرات ارتفاعی این دماغه یخچالی از حدود 0.05 ± 1.3 متر الی 0.05 ± 23 متر نوسان داشته که غالب تغییرات اتفاق افتاده به صورت منفی و در واقع فرسایشی بوده است. تغییرات در راستای یک شکاف اصلی و یک شکاف فرعی تر اتفاق افتاده و مابقی بخش‌های دماغه تغییر محسوسی نداشته‌اند. نتایج حاصله بیانگر کاهش سالانه ارتفاع شکاف اصلی دماغه این یخچال به مقدار $0.08 -$ متر بر سال است که از نوسانات مکانی قابل توجهی نیز برخوردار است. به طوری که در ارتفاعات بالاتر و نزدیک به بدنه اصلی یخچال به دلیل عقب‌نشینی و پسروری‌های مکرر سالانه، بیشترین تغییرات ارتفاعی (بین ۱۵- متر تا ۲۳- متر) را داشته و با حرکت به سمت ارتفاعات پایین‌تر به تدریج از مقدار تغییرات ارتفاعی آن نیز کاسته شده است. بدیهی است اینگونه تغییرات شدید ارتفاعی بسیار خطرناک بوده و گردشگران این منطقه توریستی را به شدت در معرض خطر قرار می‌دهد.

به منظور ارزیابی کارایی تصاویر پهپادی و لیزراسکنینگ هوایی در تهیه نقشه‌های تغییرات ارتفاعی، مقادیر خطای تغییرات ارتفاعی در منطقه غیر یخچالی ثابت پیرامون یخچال برآورد شد که نشان‌دهنده دقت بالای داده‌ها با مقدار میانگین $0.05 \pm$ و انحراف معیار 0.34 متر است. این امر

است جابه‌جایی یخرفت‌های بزرگ منجر به کاهش ارتفاع منطقه مبدأ از یک طرف و افزایش ارتفاع نقطه مقصد آن‌ها از طرف دیگر می‌شود. لذا اکثر افزایش ارتفاع‌های ثبت شده در این منطقه ناشی از اینگونه جابه‌جایی‌ها است و لزوماً به معنی افزایش ضخامت یخ زیرین آن‌ها نیست.

۴- نتیجه‌گیری

از جمله مخاطرات طبیعی مرتبط به یخچال‌های طبیعی جابه‌جایی و فروریزش واریزه‌ها و یخرفت‌های یخچالی است که به صورت ناگهانی و یا به صورت خزننده در این مناطق اتفاق می‌افتند. به طوری که سالیانه تعداد بسیار زیادی از کوهنوردان و بازدیدکنندگان از مناطق یخچالی تحت تأثیر اینگونه جابه‌جایی‌ها قرار می‌گیرند و حتی منجر به مرگ تعداد زیادی از آن‌ها در سالیان مختلف شده است. از جمله متغیرترین مناطق یخچالی می‌توان به دماغه آن‌ها اشاره کرد که هر ساله به دلیل پسروری و عقب‌نشینی سالانه یخچال‌های طبیعی منجر به فروریزش حجم قابل توجهی از انواع واریزه‌های یخچالی به مناطق پایین دست آن‌ها می‌شود. این در حالی است که امروزه با توسعه فناوری‌های نوینی همانند تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و پهپادها امکان پایش و آشکارسازی این تغییرات به خوبی و با دقت بسیار بالایی مهیا شده است. در این بین استفاده از پهپادها با توجه به قابلیت عملیاتی بسیار بالایی که دارند و همچنین سادگی استفاده و هزینه ناچیز آن‌ها در مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای بسیار مورد توجه محققین علم یخچال‌شناسی قرار گرفته و مکرراً برای پایش تغییرات سطحی و ارتفاعی یخچال‌های طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر یخچال علم‌کوه که بزرگ‌ترین و معروف‌ترین یخچال طبیعی ایران محسوب می‌شود مورد مطالعه قرار گرفته است. دماغه این یخچال که به دلیل شیب بسیار زیاد آن تحت عنوان لیزینک نامیده می‌شود یکی از دینامیک‌ترین مناطق یخچالی محسوب می‌شود که تغییرات سریع و ناگهانی در ریزش واریزه‌های آن مشاهده می‌شود.

منابع و مآخذ

- ۱- جابری اقدم، ممیزی، باقری، عزیزی، نصری؛ مهریار، محمد باقر، نیکروز، پیمان، محمد (۱۳۹۹). «تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت و مخاطرات آن با استفاده از تصویربرداری چندطیفی هوایی به وسیله پهپاد»، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۷، ش ۲، ص ۱۶۳-۱۸۰.
- ۲- وزیری، فریبرز (۱۳۸۲). «هیدرولوژی کاربردی در ایران، کتاب دوم (شناخت منابع آب‌های سطحی در ایران)، شناسایی یخچال‌های طبیعی ایران»، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات، چاپ اول.
- ۳- یمانی، مجتبی (۱۳۸۶). «اندازه‌گیری حرکت سالیانه یخچال‌های علم‌کوه»، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۶۷، بهار، ص ۳۱-۵۲.
- 4- Arnold, N.S.; Rees, W.G.; Devereux, B.J.; & Amable, G.S. (2006). "Evaluating the potential of high-resolution airborne LiDAR data in glaciology", *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp: 1233-1251.
- 5- Baldi, P.; Bonvalot, S.; Briole, P.; Coltelli, M.; Gwinner, K.; Marsella, M.; Puglisi, G.; & Rémy, D. (2002). "Validation and comparison of different techniques for the derivation of digital elevation models and volcanic monitoring (Vulcano Island Italy)", *International Journal of Remote Sensing*, 23, pp: 4783-4800.
- 6- Betts, H.D.; Trustrum, N.A.; & De Rose, R.C. 2003. "Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management", *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, pp: 1043-1058.
- 7- Brown, D.G., & Arbogast, A.F. (1999). "Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, pp: 467-474.
- 8- Clayton, A. I. (2012). "Remote sensing of subglacial bedforms from the British Ice Sheet using an unmanned aerial system (UAS): Problems and potential", Durham E-thesis Durham University.
- 9- Cox, L.H.; & March, R.S. (2004). "Comparison of

بیانگر دقت بالای روش مورد استفاده در برآورد تغییرات ارتفاعی دماغه یخچال علم‌کوه است. نتایج این تحقیق نشانگر کارایی قابل توجه استفاده از فناوری‌های نوینی همانند پهپادها برای پایش تغییرات مکانی-زمانی تغییرات یخچال‌های طبیعی، شناسایی جهت‌های جغرافیایی فروریزش یخرفت‌های یخچالی و پایش مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی است. به‌طوری که بسیاری از مخاطراتی همانند زمین لغزش‌ها، فرونشست زمین و انواع جابه‌جایی ناگهانی و یا خزنده عوارض زمین را می‌توان با استفاده از تصاویری با توالی‌های زمانی مختلف پایش و اندازه‌گیری کرد. در واقع استفاده از پهپادها به دلیل قابلیت اجرایی بالایی که دارند، می‌توانند ابزار کاملاً بهینه‌ای برای آشکار سازی مکانی-زمانی تغییرات مناطق یخچالی باشند. زیرا از یک طرف اجرا و به‌کارگیری آن‌ها در بازه‌های زمانی و قدرت تفکیک‌های مکانی مورد دلخواه امکان‌پذیر است و از طرف دیگر جمع‌آوری داده با استفاده از آن بسیار ارزان‌تر و به‌صرفه‌تر از سایر روش‌های زمینی و یا حتی ماهواره‌ای است. از طرفی پیشنهاد می‌شود به‌منظور کسب نتایج بهتر و ارائه تحلیل‌های زمانی منطقی‌تر، پایش چنین مناطق یخچالی در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (حداکثر یک‌ساله) صورت گیرد تا رابطه بین انواع تغییرات زمانی یخچال‌ها با نوسانات و تغییرات آب و هواشناسی نیز تحلیل شود.

تشکر و قدردانی

داده‌های تحقیق حاضر حاصل فعالیت‌های انجام شده در طرح محافظت از یخچال‌های طبیعی است که در مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو در حال اجرا و پیگیری است. به‌این وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از مدیران و کارشناسان محترم این مؤسسه و همه کسانی که در اجرای این تحقیق همکاری نموده‌اند و داده‌های خود را در اختیار گذاشته‌اند ابراز می‌نمایند. همچنین به‌این وسیله از داوران محترمی که زحمت داوری این مقاله را بر عهده داشتند تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

- remote sensing data for mapping debris-covered glaciers (Alamkouh Glaciers, Iran)", *Cold Regions Science and Technology*, 71, pp: 73-83.
- 19- Karimi, N.; Farokhnia, A.; Shishangosht, S.; Elmi, M.; Eftekhari, M.; & 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, pp: 45-58.
- 20- Khromova, T.E.; Osipova, G.B.; Tsvetkov, D.G.; Dyurgerov, M.B.; & Barry, R.G. (2006). "Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery", *Remote Sensing of Environment*, 102, pp: 24-32.
- 21- Kraaijenbrink, P.; Meijer, S.W.; Shea, J.M.; Pellicciotti, F.; De Jong, S.M.; & Immerzeel, W.W. (2016). "Seasonal surface velocities of a Himalayan glacier derived by automated correlation of unmanned aerial vehicle imagery", *Annals of Glaciology*, 57, pp: 103-113.
- 22- Nuth, C.; & Kääb, A. (2011). "Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change", *The Cryosphere*, 5 (1), pp: 271-290.
- 23- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; & Bamler, R. (2003). "The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, pp: 241-262.
- 24- Ren, J.; Jing, Z.; Pu, J.; & Qin, X. (2006). "Glacier variations and climate change in the central Himalaya over the past few decades", *Annals of Glaciology*, 43, pp: 218-222.
- 25- Rippin, D.M.; Pomfret, A.; & King, N. (2015). "High resolution mapping of supra-glacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness and surface reflectance", *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, pp: 1279-1290.
- 26- Toutin, T.; & Gray, L. (2000). "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, pp: 13-33.
- 27- Wangenstein, B.; Tnsberg, O.M.; Kääb, A.; Eiken, geodetic and glaciological mass-balance techniques, Gulkana Glacier, Alaska, U.S.A", *Journal of Glaciology*, 50, pp: 363-370.
- 10- Demuth, M.N. (2011). "LIDAR in Glaciology. In V.P. Singh, P. Singh, & U.K. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (pp. 713-722)". Dordrecht: Springer Netherlands.
- 11- Farajzadeh, M.; & Karimi, N. (2014). "Evidence for accelerating glacier ice loss in the Takht'e Solaiman Mountains of Iran from 1955 to 2010", *Journal of Mountain Science*, 11, pp: 215-235.
- 12- Fujita, K.; Kadota, T.; Rana, B.; Kayastha, RB.; & Ageta, Y. (2001). "Shrinkage of Glacier AX010 in Shorong region, Nepal Himalayas in the 1990s", *Bulletin of Glaciological Research*, 18, pp: 51-54.
- 13- Hapke, C.J. (2005). "Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modeling", *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, pp: 679-697.
- 14- Huang, L.; Li, Z.; Han, H.; Tian, B.; & Zhou, J. (2018). "Analysis of thickness changes and the associated driving factors on a debris-covered glacier in the Tianshan Mountain", *Remote Sensing of Environment*, 206, pp: 63-71.
- 15- Immerzeel, W.W.; Kraaijenbrink, P.D.A.; Shea, J.M.; Shrestha, A.B.; Pellicciotti, F.; Bierkens, M.F.P.; & de Jong, S.M. (2014). "High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles", *Remote Sensing of Environment*, 150, pp: 93-103.
- 16- Kääb, 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 and Remote Sensing*, 57, pp: 39-52.
- 17- Kääb, A.; and M. Vollmer. (2000). "Surface geometry, thickness changes, and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis", *Permafrost and Periglacial Processes*, 11(4), 315-326.
- 18- Karimi, N.; Farokhnia, A.; Karimi, L.; Eftekhari, M.; & Ghalkhani, H. (2012). "Combining optical and thermal

T.; Hagen, J.O. (2006). "Surface elevation change and high-resolution surface velocities for advancing outlets of Jostedalsgreen", *Geografiska Annaler*, 88A (1), pp: 55-74.

28- Whitehead, K.; Moorman, B. J.; & Hugenholz, C. H. (2013). "Brief communication: Low cost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement", *The Cryosphere*, 7(6), pp: 1879-1884.

29- Willis, M.J.; Melkonian, A.k.; Pritchard, M.E.; & Ramage, J.O. (2011). "Ice loss rates at the Northern Patagonian Icefield derived using a decade of satellite remote sensing", *Remote Sensing of Environment*, 117, pp: 184-198.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

